

XXI век : ИТОГИ ПРОШЛОГО И ПРОБЛЕМЫ НАСТОЯЩЕГО

ПЛЮС



2023

№4(64) т.12





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 Сания 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
Андреев Юрий Александрович, доктор технических наук
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 технических наук, профессор
Кручинина Наталия Евгеньевна, доктор технических наук, профессор
Куликовских Илона Марковна, доктор технических наук, доцент
Мамедова Тарана Аслан кызы, доктор технических наук, профессор
Маскевич Сергей Александрович, доктор физико-математических наук, профессор
Махмудова Любовь Ширваниевна, доктор технических наук, профессор
Милентьева Ирина Сергеевна, доктор технических наук, доцент
Михеев Михаил Юрьевич, доктор технических наук, профессор
Петрова Ирина Юрьевна, доктор технических наук, профессор
Прохоров Сергей Антонович, доктор технических наук, профессор
Рожнов Евгений Дмитриевич, доктор технических наук
Рыбаков Анатолий Валерьевич, доктор технических наук, профессор
Стороженко Павел Аркадьевич, член-корреспондент Российской академии наук, доктор
химических наук, профессор
Танклевский Леонид Тимофеевич, доктор технических наук, профессор
Таранцева Клара Рустемовна, доктор технических наук, профессор
Тихомирова Елена Ивановна, доктор биологических наук, профессор
Фатыхов Юрий Адгамович, доктор технических наук, профессор
Шалагин Сергей Викторович, доктор технических наук, доцент
Ципенко Антон Владимирович, доктор технических наук, доцент
Школьников Марина Николаевна, доктор технических наук, доцент

Ответственный секретарь

Коростелева Анна Владимировна, кандидат технических наук

Основан в 2011 г.

18+

Том 12
№ 4 (64)
2023

Журнал выходит
4 раза в год

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

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

Компьютерная верстка:
В.В. Зупарова

Технический редактор:
В.В. Зупарова

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

Подписано в печать 20.12.2023.

Выход в свет 25.12.2023.

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:

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

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

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

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

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

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

Пашенко Дмитрий Владимирович, доктор технических наук, профессор, ректор

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

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

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

Чулков Валерий Александрович, доктор технических наук, доцент,

заведующий кафедрой «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)

Андреев Юрий Александрович, доктор технических наук,

профессор кафедры «Пожарная безопасность» (Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, 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 «Процессы и аппараты

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

Баширов Мусса Гумерович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрооборудование и

автоматика промышленных предприятий (Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Салавате), Институт нефтепереработки и нефтехимии, г. Салават, Россия)

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

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

Бурахта Вера Алексеевна, доктор химических наук, профессор

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

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

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

Голуб Ольга Валентиновна, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела пищевых систем и

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

Громов Юрий Юрьевич, доктор технических наук, профессор, директор института автоматизации и информационных

технологий (Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Россия)

Давыденко Наталия Ивановна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технология и организация

общественного питания», начальник отдела подготовки научных кадров

(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)

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, заведующий кафедрой «Вычислительная техника» *(Самарский государственный технический 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, доцент кафедры биотехнологии *(Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Бийский технологический институт (филиал), г. Бийск, 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)*
Фатыхов Юрий Адгамович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Пищевых и холодильных машин» *(Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия)*
Шалагин Сергей Викторович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Компьютерные системы» *(Казанский Национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева, г. Казань, Россия)*
Ципенко Антон Владимирович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры 801 *(Московский авиационный институт, г. Москва, Россия)*
Школьникова Марина Николаевна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии питания *(Уральский государственный экономический университет, г. Екатеринбург, Россия)*

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

ОНТОЛОГИЯ ТЕХНОЛОГИИ ВКЛЮЧЕНИЯ МЕТОДА СЦЕНИРОВАНИЯ В ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ КОНКУРИРУЮЩИХ СИСТЕМ Бабич Михаил Юрьевич, Кузнецов Вячеслав Ефимович, Чигирев Михаил Александрович, Ползунов Николай Владимирович.....	12
ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ МАКЕТИРОВАНИЯ И ОТЛАДКИ ДАТЧИКО-ПРЕОБРАЗУЮЩЕЙ АППАРАТУРЫ Чернецкая Ирина Евгеньевна, Мартышкин Алексей Иванович, Сальников Игорь Иванович, Данилов Евгений Александрович.....	19
РОБАСТНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОДУКЦИИ С ЦЕЛЮ ПЛАНИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА Царева Софья Александровна, Степина Светлана Евгеньевна, Наурбиев Магомед-Хаким Хусейнович....	29
ПРАКТИКА ВНЕДРЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ СИСТЕМЫ ПРЕДПРИЯТИЙ Пащенко Татьяна Юрьевна, Парасева Анна Сергеевна, Пелюкпашиди Ксения Георгиевна.....	37
МЕТОДИКА РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЧИ И ДИАРИЗАЦИИ С ПОМОЩЬЮ МЭЛ-ЧАСТОТНЫХ КЕПСТРАЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ Ефимов Алексей Игоревич, Кузьмичев Даниил Романович.....	43
ЦИФРОВОЙ АДАПТЕР ПОДКЛЮЧЕНИЯ АППАРАТНОГО КОНТРОЛЛЕРА <i>SPACEWIRE</i> К ПЭВМ Синев Михаил Петрович, Мартышкин Алексей Иванович, Трокоз Дмитрий Анатольевич, Сальников Игорь Иванович.....	50
МЕТОД НЕЙРО-НЕЧЕТКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ФУНКЦИЙ В РЯДЫ ФУРЬЕ И МАКЛОРЕНА Морозов Сергей Михайлович.....	59
АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ ОГНЕТУШАЩЕГО ВЕЩЕСТВА В НАПОРНОМ ПОЖАРНОМ РУКАВЕ Малый Виталий Петрович, Пожаркова Ирина Николаевна, Куртов Сергей Олегович, Бабёнышев Сергей Валерьевич.....	64
БИОИНСПИРИРОВАННЫЕ СТРАТЕГИИ ОРГАНИЗАЦИИ РАСТУЩИХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ БАЗ ДАННЫХ Кольчугина Елена Анатольевна, Козлов Андрей Юрьевич, Зинкин Сергей Александрович.....	72
АППАРАТНЫЙ МОДУЛЬ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЦИФРОВОГО СИНТЕЗА ЧАСТОТЫ НА БАЗЕ ПРОГРАММИРУЕМОЙ ЛОГИЧЕСКОЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ СХЕМЫ Мартышкин Алексей Иванович, Чернецкая Ирина Евгеньевна, Данилов Евгений Александрович, Сальников Игорь Иванович.....	80
АНАЛИЗ И ВЫБОР МЕТОДА КЛАСТЕРИЗАЦИИ ДЛЯ ТЕКСТОВЫХ ДОКУМЕНТОВ КОРОТКОЙ ДЛИНЫ С ЦЕЛЮ РЕАЛИЗАЦИИ В МОДУЛЕ РЕКОМЕНДАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ВУЗА Попова Ольга Александровна.....	89

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ СЪЕМКИ ФОТОГРАФИИ НА ОСНОВЕ ВИЗУАЛЬНОГО ПОИСКА	
Никифоров Михаил Борисович, Тарасова Валентина Юрьевна.....	103
РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ МЕТОДОВ СИНТЕЗА СЕРВЕРНОЙ ЧАСТИ ПРИЛОЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ <i>CRUD</i>-АБСТРАКЦИЙ	
Рыбкин Денис Андреевич, Подмарькова Екатерина Михайловна.....	111
ЦИФРОВОЙ МОДУЛЬ РЕАЛИЗАЦИИ СТЫКА СИСТЕМНОЙ <i>USB</i>-ШИНЫ С БЛОКОМ БИИМПУЛЬСНОГО КОДИРОВАНИЯ	
Костров Борис Васильевич, Мартышкин Алексей Иванович, Трокоз Дмитрий Анатольевич, Сальников Игорь Иванович.....	118
ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ АПК РОССИИ	
Пашенко Татьяна Юрьевна, Тимохина Дарья Михайловна.....	127
<i>ПИЩЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ</i>	
ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЦЕПТУРНЫХ ИНГРЕДИЕНТОВ МЕТОДОМ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА В РЕЦЕПТУРЕ МАРМЕЛАДА ИЗ ТЫКВЫ	
Абушаева Асия Рафаильевна, Садыгова Мадина Карипулловна, Семилет Никита Александрович, Абдряшитова Марьям Рауфовна.....	132
ПРИМЕНЕНИЕ БИОЗАЩИТНЫХ КУЛЬТУР В ТЕХНОЛОГИИ СНЕКОВ ИЗ МЯСА ПТИЦЫ	
Базарнова Юлия Генриховна, Москвичев Александр Сергеевич, Москвичева Елена Владимировна, Николаев Илья Александрович.....	142
АНАЛИЗ СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ «МНОГОМЕСТНАЯ МАШИНА – ОПЕРАТОР – АВТОМАТИЧЕСКИЙ МАНИПУЛЯТОР»	
Мурашкина Оксана Александровна, Сарафанкина Елена Александровна, Авроров Валерий Александрович.....	150
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОРОШКА МЕСКИТА В ПРОИЗВОДСТВЕ БЕЗГЛЮТЕНОВОГО ПЕЧЕНЬЯ	
Нилова Людмила Павловна, Малютенкова Светлана Михайловна.....	154
РАЗРАБОТКА ОБОГАЩЁННОГО ЙОГУРТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСТИТЕЛЬНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТОВ	
Погосян Давид Гарегинович.....	160
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ЗАТРАТ ПРИ ГИДРОФЕРМЕНТАТИВНОЙ ОБРАБОТКЕ ЗЕРНА НА СПИРТ С ЦЕЛЮ ИХ ОПТИМИЗАЦИИ И СОКРАЩЕНИЯ	
Туршатов Михаил Владимирович, Кривченко Вера Александровна, Соловьев Александр Олегович, Никитенко Виктория Дмитриевна.....	166
ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ И БИОРАЗЛАГАЕМОСТИ УПАКОВКИ АРМИРОВАННОЙ ЛУЗГОЙ ГРЕЧИХИ	
Семухин Александр Сергеевич, Заворохина Наталия Валерьевна, Тарасов Алексей Валерьевич.....	172
РОЛЬ <i>BACILLUS AMYLOLIQUEFACIENS</i> В СНИЖЕНИИ АБИОТИЧЕСКОГО СТРЕССА ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР	
Серазетдинова Юлия Ренатовна, Фотина Наталья Вячеславовна, Асякина Людмила Константиновна, Просеков Александр Юрьевич, Неверова Ольга Александровна.....	178

К ВОПРОСУ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЛОДОВ И ЛИСТЬЕВ МАЛИНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ В СОСТАВЕ ЧАЙНОГО НАПИТКА

Рожнов Евгений Дмитриевич, Школьников Марина Николаевна,
Пастушкова Екатерина Владимировна.....184

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

ИДЕНТИФИКАЦИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И ПОВРЕЖДЕННОСТИ МЕТАЛЛА ОБОРУДОВАНИЯ ПОЖАРООПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ НЕФТЕГАЗОВОГО ПРОИЗВОДСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИНАМИЧЕСКОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Баширов Мусса Гумерович, Баширова Эльмира Муссаевна,
Юсупова Ильвина Гамировна, Акчурин Дамир Шамилевич.....195

СНИЖЕНИЕ РИСКА ВРЕДНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ПЕРСОНАЛ

Закирова Альфия Резавановна.....203

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ И НАРУШЕНИЙ СЛУХА НА ВОСПРИЯТИЕ СИГНАЛОВ ЗАДНЕГО ХОДА ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

Дмитриев Михаил Сергеевич, Старунов Александр Владимирович,
Руднев Валерий Валентинович, Хасанова Марина Леонидовна.....207

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ К РАЗРАБОТКЕ СХЕМЫ ЭВАКУАЦИИ ПРИ ПОЖАРЕ

Авдеева Марина Олеговна, Бызов Антон Прокопьевич,
Климова Ирина Викторовна, Доронин Александр Сергеевич.....215

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ТРУДА РАБОТНИКОВ, ЗАНЯТЫХ ПРИ ТЕРМОШАХТНОЙ ДОБЫЧЕ ВЫСОКОВЯЗКОЙ НЕФТИ

Мяков Владислав Владимирович, Коршунов Геннадий Иванович,
Кабанов Евгений Игоревич.....222

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА МОНИТОРИНГА БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА НА ПРЕДПРИЯТИЯХ СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Горбунова Ольга Владимировна, Нам Галина Евгеньевна, Падерно Павел Иосифович.....229

МОДЕРНИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ АДСОРБЕРА НА ОСНОВЕ СОРБЦИОННОЙ ОЧИСТКИ ВОДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАНУЛИРОВАННОГО СОРБЕНТА ОКСИД ГРАФЕНА-ХИТОЗАН

Чельшева Валентина Павловна, Политаева Наталья Анатольевна, Романов Михаил Васильевич,
Молодкина Людмила Михайловна, Щур Александр Васильевич.....239

ВНЕДРЕНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЁТА КАТЕГОРИИ РИСКА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТРЕХСТУПЕНЧАТОГО КОНТРОЛЯ ПО ОХРАНЕ ТРУДА

Румянцева Нина Вячеславовна, Бурлов Вячеслав Георгиевич,
Колесников Евгений Юрьевич, Красильников Алексей Игоревич.....244

АНАЛИЗ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ТРАВМАТИЗМА В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ОТРАСЛИ

Контарева Валентина Юрьевна, Белик Светлана Николаевна.....250

БИОМОНИТОРИНГ ХОДА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЭКОСИСТЕМ МЕСТА АВИАЦИОННОГО ПРОИСШЕСТВИЯ

Николайкин Николай Иванович, Николайкина Наталья Евгеньевна,
Старков Евгений Юрьевич.....259

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОХРАНОЙ ТРУДА НА ПРЕДПРИЯТИИ С УЧЕТОМ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ РИСКОВ Королев Илья Викторович, Закревский Андрей Андреевич.....	266
ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОВМЕСТНОГО ВЛИЯНИЯ ПОЛЛЮТАНТОВ НА ФИТОТОКСИЧНОСТЬ ПОЧВ ПРИБРЕЖНЫХ ЗОН ВНУТРЕННИХ ВОДНЫХ ПУТЕЙ Мясникова Ирина Борисовна, Павлова Светлана Михайловна, Морозова Анастасия Владимировна.....	272
ЭТАНОЛЬНЫЕ ЩЕЛОЧНЫЕ ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ КАК ПРИМЕР ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ЭНЕРГИИ Таранцева Клара Рустемовна, Таранцев Константин Валентинович, Коростелева Анна Владимировна, Полянскова Екатерина Александровна.....	279
ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ВОДЫ НА ПОЖАРНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ВОЗДУШНО-МЕХАНИЧЕСКОЙ ПЕНЫ Волик Андрей Сергеевич, Булатов Наиль Назимович, Шешина Наталья Ивановна.....	288
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЛАГОПРОВОДНОСТИ ПОЧВЫ ПРИ ОЦЕНКЕ АНТРОПОГЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ Панфилова Марина Ивановна, Ефремова Сания Юнусовна, Холуденева Алина Олеговна.....	294
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ОПОЛЗНЕЙ КАК ИНСТРУМЕНТ МОНИТОРИНГА БЕЗОПАСНОСТИ В ЦИКЛЕ УПРАВЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИМИ РИСКАМИ Фролова Нина Анатольевна, Шкрабтак Наталья Викторовна, Степакова Наталья Николаевна.....	298

CONTENT
INFORMATION SCIENCE, COMPUTING DEVICES AND CONTROLLING
**ONTOLOGY OF TECHNOLOGY INCLUDING THE SCENING METHOD
IN THE OPERATION OF SPECIALIZED COMPETING SYSTEMS**

Babich Mikhail Yurievich, Kuznetsov Vyacheslav Efimovich,
Chigirev Mikhail Alexandrovich, Polzunov Nikolay Vladimirovich.....12

**SOFTWARE MODULE OF THE INFORMATION-COMPUTING SYSTEM
FOR PROTOTYPING AND DEBUGGING OF SENSOR-TRANSFORMING EQUIPMENT**

Chernetskaya Irina Evgenievna, Martyshkin Alexey Ivanovich,
Salnikov Igor Ivanovich, Danilov Evgeny Alexandrovich.....19

ROBUST DESIGN OF PRODUCT PARAMETERS FOR QUALITY PLANNING

Tsareva Sofya Alexandrovna, Stepina Svetlana Evgenievna, Naurbiev Magomed-Hakim Huseinovich.....29

**THE PRACTICE OF IMPLEMENTATION OF ARTIFICIAL
INTELLIGENCE INTO ENTERPRISE PRODUCTION SYSTEMS**

Pashchenko Tatiana Yuryevna, Paraeva Anna Sergeevna, Pelyukpashidi Ksenia Georgievna.....37

**THE TECHNIQUE OF SPEECH RECOGNITION AND DIARIZATION
USING MEL-FREQUENCY CEPSTRAL COEFFICIENTS**

Efimov Aleksey Igorevich, Kuzmichev Daniil Romanovich.....43

**DIGITAL ADAPTER FOR CONNECTING THE *SPACEWIRE* HARDWARE
CONTROLLER TO A PERSONAL COMPUTER**

Sinev Mikhail Petrovich, Martyshkin Alexey Ivanovich,
Trokoz Dmitry Anatolyevich, Salnikov Igor Ivanovich.....50

METHOD OF NEURO-FUZZY FOURIER AND MACLAURIN EXPANSION OF FUNCTIONS

Morozov Sergey Mikhailovich.....59

**YSIS OF PROCESSES OCCURING WITH FREE CONVECTION
OF FIRE EXTINGUISHING AGENTS IN PRESSURE FIRE HOSES**

Maly Vitaly Petrovic, Pozharkova Irina Nikolaevna,
Kurtov Sergei Olegovic, Babenyshev Sergey Valerievich.....64

THE BIO-INSPIRED STRATEGIES FOR ORGANIZING GROWING DISTRIBUTED DATABASES

Kol'chugina Elena Anatolyevna, Kozlov Andrey Yur'evich, Zinkin Sergey Aleksandrovich.....72

**HARDWARE MODULE OF COMPUTING SYSTEM FOR DIGITAL FREQUENCY
SYNTHESIS ON THE BASIS OF PROGRAMMABLE LOGIC INTEGRATED CIRCUIT**

Martyshkin Alexey Ivanovich, Chernetskaya Irina Evgenievna,
Danilov Evgeny Alexandrovich, Salnikov Igor Ivanovich.....80

**ANALYSIS AND SELECTION OF A METHOD OF CLUSTERIZATION OF SHORT
LENGTH TEXT DOCUMENTS FOR IMPLEMENTATION IN THE UNIVERSITY
RECOMMENDER SYSTEM MODULE**

Popova Olga Aleksandrovna.....89

**METHOD FOR DETERMINING PHOTO SHOOTING LOCATION
BASED ON VISUAL SEARCH**

Nikiforov Mikhail Borisovich, Tarasova Valentina Yuryevna.....103

DEVELOPMENT OF AUTOMATED METHODS FOR SYNTHESIS THE SERVER SIDE OF APPLICATIONS BASED ON <i>CRUD</i> ABSTRACTIONS	
Rybkin Denis Andreevich, Podmarkova Ekaterina Mikhailovna.....	111
DIGITAL MODULE FOR REALIZATION OF SYSTEM USB-BUS JUNCTION WITH BIPULSE CODING BLOCK	
Kostrov Boris Vasilyevich, Martyshkin Alexey Ivanovich, Trokoz Dmitry Anatolyevich, Salnikov Igor Ivanovich.....	118
PROBLEMS AND PROSPECTS OF INNOVATIVE DEVELOPMENT OF RUSSIA'S AIC	
Pashchenko Tatiana Yuryevna, Timokhina Daria Mikhailovna.....	127
<i>FOOD TECHNOLOGY</i>	
OPTIMIZATION OF PRESCRIPTION INGREDIENTS BY REGRESSION ANALYSIS IN THE FORMULATION OF PUMPKIN MARMALADE	
Abushaeva Asiya Rafailyevna, Sadygova Madina Karipullova, Semilet Nikita Aleksandrovich, Abdryashitova Maryam Raufovna.....	132
APPLICATION OF BIOPROTECTIVE CROPS IN THE TECHNOLOGY OF POULTRY MEAT SNACKS	
Bazarnova Julia Genrihovna, Moskvichev Aleksandr Sergeevich, Moskvicheva Elena Vladimirovna, Nikolaev Ilya Aleksandrovich.....	142
ANALYSIS OF THE QUEUING SYSTEM "MULTI-SEAT MACHINE - WORKER - AUTOMATIC MANIPULATOR"	
Murashkina Oxana Aleksandrovna, Sarafankina Elena Aleksandrovna, Avrorov Valery Aleksandrovich.....	150
USING MESQUITE POWDER IN THE PRODUCTION OF GLUTEN-FREE COOKIES	
Nilova Liudmila Pavlovna, Malyutenkova Svetlana Mikchailovna.....	154
DEVELOPMENT OF ENRICHED YOGURT USING PLANT FUNCTIONAL COMPONENTS	
Poghosyan David Gareginovich.....	160
INVESTIGATION OF THERMAL COSTS DURING HYDROFERMENTATIVE PROCESSING OF GRAIN FOR ALCOHOL IN ORDER TO OPTIMIZE AND REDUCE THEM	
Turshatov Mikhail Vladimirovich, Krivchenko Vera Alexandrovna, Solovyov Alexander Olegovich, Nikitenko Victoria Dmitrievna.....	166
STADY OF THE PROPERTIES AND BIODEGRADABILITY OF PACKAGING REINFORCED WITH BUCKWHEAT HUSK	
Semukhin Aleksandr Sergeevich, Zavorokhina Natalia Valerievna, Tarasov Alexey Valerievich.....	172
THE ROLE OF <i>BACILLUS AMYLOLIQUEFACIENS</i> IN REDUCING THE ABIOTIC STRESS OF CEREALS	
Serazetdinova Yulia Renatovna, Fotina Natalya Vyacheslavovna, Asyakina Lyudmila Konstantinovna, Prosekov Aleksandr Yur'yevich, Neverova Olga Aleksandrovna.....	178
ON THE ISSUE OF USING THE FRUITS AND LEAVES OF THE COMMON RASPBERRY IN TEA DRINK	
Rozhnov Evgeniy Dmitrievich, Shkolnikova Marina Nikolaevna, Pastushkova Ekaterina Vladimirovna.....	184

TECHNOSPHERE SAFETY

IDENTIFICATION OF STRESS-STRAIN STATE AND DAMAGE OF METAL OF EQUIPMENT OF FIRE HAZARDOUS OBJECTS OF OIL AND GAS PRODUCTION USING A DYNAMIC MATHEMATICAL MODEL Bashirov Mussa Gumerovich, Bashirova Elmira Mussayevna, Yusupova Ilvina Gamirovna, Akchurin Damir Shamilevich.....	195
REDUCING THE RISK OF HARMFUL EFFECTS OF MAGNETIC FIELDS ON PERSONNEL Zakirova Alfiya Rezavanovna.....	203
STUDY OF THE INFLUENCE OF PERSONAL PROTECTION EQUIPMENT AND HEARING IMPAIRMENTS ON THE PERCEPTION OF THE TRUCKS REVERSE SIGNALS Dmitriev Mikhail Sergeevich, Starunov Aleksandr Vladimirovich, Rudnev Valery Valentinovich, Khasanova Marina Leonidovna.....	207
APPLICATION OF SIMULATION MODELING METHODS TO THE DEVELOPMENT OF AN EVACUATION SCHEME IN CASE OF FIRE Aydeeva Marina Olegovna, Byzov Anton Prokopievich, Klimova Irina Viktorovna, Doronin Alexander Sergeevich.....	215
ANALYSIS OF WORKING CONDITIONS OF EMPLOYEES ENGAGED IN THERMAL SHAFT EXTRACTION OF HIGH-VISCOSITY OIL Miakov Vladislav Vladimirovich, Korshunov Gennadiy Ivanovich, Kabanov Eugeny Igorevich.....	222
MATHEMATICAL MODEL OF THE OCCUPATIONAL SAFETY MONITORING PROCESS IN CONSTRUCTION INDUSTRY USING INFORMATION MODELING TECHNOLOGY Gorbunova Olga Vladimirovna, Nam Galina Evgenievna, Paderno Pavel Iosifovich.....	229
MODERNIZATION OF AN ADSORBER DESIGN BASED ON SORPTION WATER PURIFICATION USING GRANULAR SORBENT GRAPHENE OXIDE-CHITOSAN Chelysheva Valentina Pavlovna, Politayeva Natalya Anatolyevna, Romanov Mikhail Vasilievich, Molodkina Lyudmila Mikhailovna, Shur Alexander Vasilievich.....	239
INTRODUCTION OF A METHODOLOGY FOR CALCULATING THE RISK CATEGORY FOR THREE-STAGE LABOR PROTECTION CONTROL Rumyantseva Nina Vyacheslavovna, Burlov Vyacheslav Georgievich, Kolesnikov Evgeny Yurievich, Krasilnikov Alexey Igorevich.....	244
ANALYSIS OF OCCUPATIONAL INJURIES IN THE AGRICULTURAL INDUSTRY Kontareva Valentina Yuryevna, Belik Svetlana Nikolaevna.....	250
BIOMONITORING OF THE OF AVIATION INCIDENT PLACE ECOSYSTEMS RESTORATION COURSE Nikolaykin Nikolay Ivanovich, Nikolaykina Natalia Evgenevna, Starkov Evgenii Iurevich.....	259
IMPROVING THE OCCUPATIONAL SAFETY MANAGEMENT SYSTEM AT THE ENTERPRISE, TAKEN INTO ACCOUNT OF PROFESSIONAL RISKS Korolev Ilya Viktorovich, Zakrevsky Andrey Andreevich.....	266
DETERMINATION OF THE JOINT EFFECT OF POLLUTANTS ON PHYTOTOXICITY OF SOILS OF COASTAL ZONES OF INLAND WATERWAYS Myasnikova Irina Borisovna, Pavlova Svetlana Mikhailovna, Morozova Anastasia Vladimirovna.....	272

**ETHANOL ALKALI FUEL CELLS AS AN EXAMPLE OF ENVIRONMENTALLY
SAFE ENERGY PRODUCTION TECHNOLOGY**

Tarantseva Klara Rustemovna, Tarantsev Konstantin Valentinovich,
Korosteleva Anna Vladimirovna, Polyanskova Ekaterina Alexandrovna.....279

**SELECTION AND REASONING OF CORROSION-RESISTANT STRUCTURAL
MATERIALS FOR THE PRODUCTION NEEDS OF THE OIL AND GAS COMPLEX**

Volik Andrey Sergeevich, Bulatov Nail Nazimovich, Sheshina Natalya Ivanovna.....288

**PREDICTION OF SOIL MOISTURE CONDUCTIVITY WHEN
ASSESSING ANTHROPOGENIC IMPACTS**

Panfilova Marina Ivanovna, Efremova Sania Yunusovna, Kholudeneva Alina Olegovna.....294

**REMOTE SENSING OF LANDSLIDES AS A SAFETY MONITORING TOOL IN
THE CYCLE OF ENVIRONMENTAL RISK MANAGEMENT**

Frolova Nina Anatolyevna, Shkrabtak Natalya Viktorovna, Stepakova Natalya Nikolaevna.....298

УДК 004.94

EDN: ACNKTD

ОНТОЛОГИЯ ТЕХНОЛОГИИ ВКЛЮЧЕНИЯ МЕТОДА СЦЕНИРОВАНИЯ В ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ КОНКУРИРУЮЩИХ СИСТЕМ

© Автор 2023

SPIN: 4160-9697

AuthorID: 651403

ORCID: 0000-0003-2969-1055

БАБИЧ Михаил Юрьевич, доктор технических наук, главный специалист центра

АО «Научно-производственное предприятие «Рубин»

(440015, Россия, Пенза, ул. Байдукова, д. 2, e-mail: babichmj@mail.ru)

ORCID: 0009-0008-1544-6650

КУЗНЕЦОВ Вячеслав Ефимович, кандидат технических наук, начальник центра

АО «Научно-производственное предприятие «Рубин»

(440015, Россия, Пенза, ул. Байдукова, д. 2, e-mail: 69vek@mail.ru)

ORCID: 0009-0006-9862-2124

ЧИГИРЕВ Михаил Александрович, заместитель начальника отделения центра

АО «Научно-производственное предприятие «Рубин»

(440015, Россия, Пенза, ул. Байдукова, д. 2, e-mail: michael-chigirev@yandex.ru)

ORCID: 0009-0007-2304-526X

ПОЛЗУНОВ Николай Владимирович, начальник отдела центра АО

«Научно-производственное предприятие «Рубин»

(440015, Россия, Пенза, ул. Байдукова, д. 2, e-mail: nickpc15@mail.ru)

Аннотация. Насущной задачей должностных лиц в подсистеме управления сложных организационно-технических систем является прогнозирование состояния системы и окружающей среды. Это требует формализации функций системы, что не всегда возможно. Приведены причины сложности создания прогнозных моделей состояния систем. Одним из подходов решения проблемы является использование метода сценирования, который поддерживается технологией включения метода в программное и информационное обеспечение системы. Однако при этом пользователям технологии необходимо оставаться в рамках ее принципов, соблюдать правила технологии и одновременно выполнять требования технического задания на создаваемую систему. Это позволяет осуществить онтологию подобных технологий. Описан опыт разработки такой онтологии. Разработанная онтология представлена в рамках технологии имитационного макетирования, позволяющей включать алгоритмы метода сценирования на этапе проектирования и создания программного и информационного обеспечения системы. Приведены формальные модели полной онтологии. Рассмотрены корневые родительские классы и ими определяемые иерархии понятий. Проанализированы свойства классов, отношения между ними, аксиомы и ограничения. Модель онтологии применена в процессе создания систем охраны особо важных объектов с замкнутыми и разомкнутыми границами от проникновения нарушителей, в которых активно использовались сценарии проникновения. Описаны результаты создания онтологии и выводы, полученные на их основе.

Ключевые слова: организационно-техническая система, специализированная система, подсистема управления, подсистема поддержки принятия решений, лицо, принимающее решение, метод сценирования, Форсайт-метод, модель онтологии, имитационное макетирование, таксономия.

ONTOLOGY OF TECHNOLOGY INCLUDING THE SCENING METHOD IN THE OPERATION OF SPECIALIZED COMPETING SYSTEMS

© The Author 2023

BABICH Mikhail Yurievich, doctor Sc.(technology), department main specialist

JSC Research and Production Enterprise «Rubin»

(440015, Penza, Russia, Baidukova str., 2, e-mail: babichmj@mail.ru)

KUZNETSOV Vyacheslav Efimovich, cand.sc.(technology), head of the Center

JSC Research and Production Enterprise «Rubin»

(440015, Penza, Russia, Baidukova str., 2, e-mail: 69vek@mail.ru)

CHIGIREV Mikhail Alexandrovich, deputy head of division

JSC Research and Production Enterprise «Rubin»

(440015, Penza, Russia, Baidukova str., 2, e-mail: michael-chigirev@yandex.ru)

POLZUNOV Nikolay Vladimirovich, head of department

JSC Research and Production Enterprise «Rubin»

(440015, Penza, Russia, Baidukova str., 2, e-mail: nickpc15@mail.ru)

Abstract An urgent task for officials in the management subsystem of complex organizational and technical systems is to predict the state of the system and the environment. This requires formalization of the system functions, which is

not always possible. The reasons for the difficulty of creating predictive models of systems state are given. One approach to solving the problem is to use the staging method, which is supported by the technology of incorporating the method into the software and information support of the system. However, at the same time, users of the technology must remain within the framework of its principles, comply with the rules of the technology and at the same time fulfill the requirements of the technical specifications for the system being created. The ontology of such technologies allows us to implement this. The experience of developing such an ontology is described. The developed ontology is given within the framework of simulation prototyping technology, which makes it possible to include algorithms of the scenario method at the stage of design and creation of software and information support for the system. Formal models of the complete ontology are presented. The root parent classes and the hierarchies of concepts they define are considered. The properties of classes, relationships between them, axioms and restrictions are given. The ontology model was applied in the process of creating systems for protecting particularly important objects with closed and open boundaries from the penetration of intruders, in which penetration scenarios were actively used. The results of creating the ontology and the conclusions obtained based on them are described. Key words: imitation layouts, multi-agent system, ontology model, program layouts.

Keywords. organizational and technical system, specialized system, management subsystem, decision support subsystem, decision maker, scenario method, Foresight method, ontology model, simulation prototyping, taxonomy.

Для цитирования: Бабич М.Ю. Онтология технологии включения метода сценарирования в функционирование специализированных конкурирующих систем / М.Ю. Бабич, В.Е. Кузнецов, М.А. Чигирев, Н.В. Ползунов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 12. – № 4(64). – С. 12-18. – EDN: ACNKTD.

Введение. Класс организационно-технических систем, находящихся в конкуренции, достаточно широк: начиная со спортивных команд и кончая специализированными системами, принимающими участие в силовых столкновениях. Прогнозирование состояния своей системы, системы конкурента, окружающей среды в зависимости от принятых решений является насущной задачей должностных лиц в подсистеме управления (ПУ) рассматриваемых систем. Чем сложнее система, тем сложнее управление и тем чаще используются автоматизированные вычислительные комплексы поддержки принятия решений (ППР). Однако для этого необходимо формализовать процессы, протекающие при функционировании систем. Наиболее сложными процессами являются процессы противоборств силовых структур. В настоящее время их сложность увеличивается: необходимо учитывать типы и характер многих других столкновений. Результат принятых решений зависит от экономических, информационных, гибридных, прокси и других конкурентных взаимодействий.

В работе рассматривается функционирование сложных организационно-технических систем, находящихся в состоянии конкуренции, включая специализированные системы силовых структур (ВС МО, МВД, ФСО, Росгвардия и т.д.). По мнению многих исследователей, проблемы, связанные с вопросами прогнозирования не только специализированных, но и обычных сложных организационно-технических систем, где человеческий фактор играет важную роль, часто являются сложноразрешимыми. Первые работы, посвященные аналогичным проблемам, были опубликованы сравнительно давно [1, 2]. В последнее время количество подобных работ резко возросло, например, [3-12]. Приведем наиболее резкое, но характерное мнение: «Создание полноценной математической модели будущих военных действий

невозможно» [3, с. 73].

Сложность создания прогнозных моделей, на наш взгляд, обусловлена следующим:

- нелинейностью систем рассматриваемого класса и, как следствие, сложностью прогнозирования фазовой траектории выхода из области притяжения странных аттракторов, точек бифуркации [13];

- отсутствием надежных статистических данных из-за нечастых конкурентных столкновений и быстрого развития используемых стратегий, тактик, методов;

- отсутствием точной информации (НЕ-факторы), циркулирующей в контуре систем рассматриваемого класса, на основе которой принимаются решения по управлению;

- иррациональностью [14, 15] и относительной рациональностью [16, 17] человека в контуре систем и ПУ;

- отсутствием возможности формализации человеческой (не компьютерной) логики в процессе принятия решений в сложных и нетрадиционных условиях функционирования систем [18-21].

Таким образом, наблюдается определенный кризис в области прогнозирования функционирования сложных специализированных организационно-технических систем, находящихся в конкуренции (далее – просто «система»).

Одним из способов преодоления возникших проблем является использование метода сценарирования, который позволяет определить возможные состояния системы после предполагаемых решений путем анализа различных вариантов развития событий. Методика сценарирования была разработана Германом Каном в рамках Форсайт-метода [22]. За счет ухода от полной формализации процессов, протекающих в системах, метод сценарирования позволяет нивелировать наблюдающийся кризис прогнозирования. Поэтому его включение, то есть его

реализация в работе систем, является целесообразной.

Возможности применения технологии сценирования, Форсайт-метода и аналогичных им методов активно обсуждаются в современных научно-технических публикациях [23-26].

Метод сценирования не совсем традиционен как для разработчиков, так и для заказчиков систем. Кроме того, возникает ряд проблем при его использовании.

Метод сценирования предназначен в основном для долгосрочного планирования с привлечением группы экспертов, а для рассматриваемых систем необходима, если не работа в реальном масштабе времени, то краткосрочная оценка результатов управляющего воздействия. Организация опроса экспертов очень затруднительна.

Функционирование системы не ограничивается только использованием прогнозных моделей. Кроме ПУ, где необходимо определение результатов управляющего воздействия и функционирует ППР, существуют другие подсистемы (например, подсистемы наблюдения, подавления, передачи информации и т.д.).

Таким образом, реализация метода сценирования в процессе создания систем должна быть поддержана технологией включения метода в программное обеспечение (ПО) и информационное обеспечение (ИО), создающиеся для выполнения всех функций системы и ее подсистем. Технология должна обладать возможностью использовать метод для краткосрочных прогнозов с привлечением минимального количества должностных лиц в качестве экспертов.

Пользователи подобных технологий являются разработчиками ПО и ИО системы, характеристики которой должны соответствовать техническому заданию заказчика. Разрабатываемая технология включения метода сценирования должна быть использована в процессе разработок не одной, а многих систем, но каждая система обладает своими особенностями и требованиями (в соответствии с техническим заданием). Возникает задача адаптации процессов проектирования и создания ПО и ИО системы с идеями и техникой технологии. Практика показала, что для эффективной работы при использовании подобных технологий недостаточно технической документации, передаваемой пользователям, а организация обучения не всегда возможна. Выходом из сложившейся ситуации является создание онтологии технологии, которая включается в ПО и ИО технологической поддержки.

Цель работы – реализация онтологии технологии, позволяющей пользователям технологии, с одной стороны, разрабатывать ПО и ИО при соблюдении правил и требований технологии, а с другой – обходить приведенные выше проблемы в процессе использования метода сценирования.

Методология. Рассматривается опыт создания онтологии, выполненной в рамках разработки

онтологии технологии имитационного макетирования. Технология имитационного макетирования позволяет включать метод сценирования непосредственно на этапе разработки ПО, ИО системы и частично решает приведенные выше проблемы [27, 28]. Созданная онтология описывает в качестве предметной области технологию имитационного макетирования.

Имитационное макетирование основано на взаимодействии программ, имитирующих функции объектов конкурента, и реальных программ ПО ПУ. Имитационное макетирование позволяет работать лицам, принимающим решение (ЛПР), в двух режимах: имитационном и реальном. Создается конкурентная среда. Взаимодействие с ней имитационных программ происходит по тем же протоколам взаимодействия, что и при реальной работе. При этом используется метод прецедентов для ориентации ЛПР в пространстве принятых решений [29]. Накопление базы данных (БД) прецедентов происходит в режиме имитации и в режиме реальной работы. При имитации происходят обучение и тренировка ЛПР, при реальной работе – нахождение приемлемого ранее совершенного управляющего воздействия. Имитационное макетирование поддерживает создание сценариев и их исполнение. Сценарии могут быть двух типов: заранее созданные и хранящиеся в базе данных технологии или ментальные. В первом случае имитация функционирования объектов происходит автоматически, во втором – под управлением агента-тестера. Агент-тестер – это человек, управляющий со своего компьютера действиями имитационного объекта в зависимости от складывающейся ситуации.

Рассматриваемая онтология имитационного макетирования обладает, как и другие онтологии, согласованной концептуализацией, то есть подразумевается, что онтология является общей для всех пользователей вне зависимости от разрабатываемой системы.

Проблемы разработок онтологий для обеспечения интероперабельности при большой разнородности архитектурных решений, форматов и стандартов данных рассматривались в [30, 31]. Один из подходов – разработка онтологии, основанной на применении нечетких графов с множественными и разнотипными связями [31]. Однако в нашем случае задача упрощалась. Требовалось не обеспечить интеграцию разнородных знаний, а всего лишь удержать пользователей-разработчиков систем в рамках технологии, то есть онтология должна была быть значительно проще и не требовать привлечения ресурсов больше, чем создание самой технологии.

Результаты. Рассмотрим простую формальную модель онтологии:

$$O = (C, R, F), \quad (1)$$

где O – онтология; C – непустое множество классов предметной области; R – конечное множество отношений; F – конечное множество функций, правил

аксиоматизации.

В начале работы по ряду ограничений онтология была спроектирована при $F = \emptyset$, но в любом случае отношения R между классами a , b , реализующие сетевой онтограф, интерпретируются как «Класс a содержит класс b » или «Класс b уточняет класс a в некотором определенном смысле».

Наименование класса – это некоторый термин, понятие, с которым должен оперировать пользователь. Например, понятие a = «Имитационное макетирование» содержит в себе понятия m = «Группа подыгрыша», n = «Замкнутое ПО». Выполняется

$$(arm, arn) \wedge (a, m, n) \in C \wedge (r \in R). \quad (2)$$

Каждое понятие определяется и разъясняется пользователю. Причем определения понятий не берутся из какого-либо словаря или справочника, так как понятия, которые используются в технологии имитационного макетирования, иногда не совсем соответствуют устоявшимся. Они приведены в рабочих инструкциях, технических проектах, статьях и других документах разработчиков технологии. Так как разработка шла на протяжении многих лет, часто вносились изменения и уточнения, корректировалась и используемая терминология. Иногда вносились новые, редко или ранее не используемые в научных исследованиях понятия, например, «Должностное лицо-тестер». В некоторых случаях понятия интерпретируются известными в научных кругах авторами по-разному. Определения понятий взяты так, как их понимают разработчики технологии. Это было сделано для более ясного понимания пользователями идей, вложенных в технологию. Иногда в спорных ситуациях в разъяснении указывается источник определения терминологии.

Чтобы не заставлять пользователя «блуждать» по онтографу, в онтологию включен список всех классов, расположенных в алфавитном порядке. Пользователю предоставлена функция выбора наименования класса и его автоматического поиска в онтографе.

Если пользователь не выходит к классу b напрямую в результате поиска, то отношение arb дает ему возможность ознакомиться с понятием b только после ознакомления с понятием a . Отношение arb как бы расширяет знакомство пользователя с понятием a . Последовательная детализация, то есть движение вниз от корневой вершины к лепесткам (вершинам без выходных дуг), позволяет пользователю уточнять детали технологии.

Во множество классов C включено около 225 понятий с возможностью дальнейшего расширения множества.

В корневые родительские классы входят следующие понятия: «Информационное обеспечение»; «Искусственный интеллект»; «Модель системы»; «Программное обеспечение»; «Система»; «Техническое обеспечение». Каждый родительский класс определяет свою иерархию.

Наибольшая глубина вложения классов составляет шесть уровней иерархии. На рисунке 1 приведена шестиуровневая неполная иерархия (только глубина).

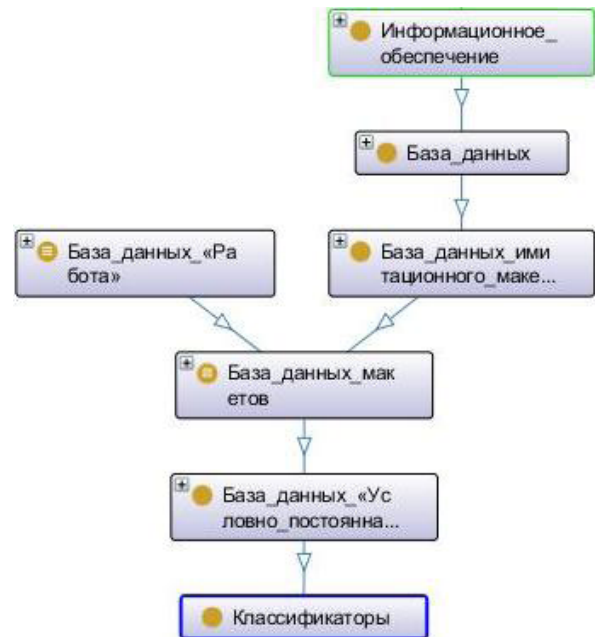


Рисунок 1– Иерархия классов

В онтологии приводятся описания БД технологии и некоторые таблицы. Например: БД «Анализ», БД «Документ», БД «Имитация», БД макетов, БД ядра.

Пользователь (разработчик системы) не ограничен в выборе своей концептуальной модели БД. Важно, чтобы его модель БД не находилась в противоречии с технологией, в рамках которой он находится. Определение назначения каждой БД и их детализация позволяют не только вводить разработчика в терминологию рассматриваемой технологии, но и определять концептуальную модель БД создаваемой системы.

После создания полного множества классов и отношений стало понятно, что введение функций и аксиом онтологии еще больше удерживало бы пользователя в рамках правил технологии при создании реальной системы. Кроме того, если в разработке системы не используются какие-либо другие технологии создания и тестирования ПО и ИО, то расширение множества F из (1) позволяет контролировать результаты работы над ПО и ИО, а также избегать элементарных ошибок в планировании и описании результатов. Поэтому были введены новые функции, ограничения, дополнительные свойства и экземпляры классов.

Формальная модель онтологии (1) расширена до полной онтологии:

$$O = (C, R, F, A(D, H)) \quad (3)$$

где $F \neq \emptyset$, A – конечное множество аксиом; D – множество дополнительных определений понятий; H – множество ограничений.

Введен ряд функций и транзитивных свойств (свойства объектов). Например, «устройство находится в состоянии»; «программа находится в»; «включает устройство»; «программа вызывает» и другие. Включены экземпляры классов: «программа (наименование)»; «устройство (наименование)»; «таблица (наименование)»; «свойства (тип данных)», – отражающие описания объектов и технические характеристики.

Пользователь в модель онтологии может внести описание структуры ПУ, характеристики ЛПР и других должностных лиц.

Таким образом, за исключением ее части, отно-

сящейся к описанию используемых понятий, пользователь может активно влиять на содержание онтологии, частично изменять множества C, R, F, A, D, H .

Онтология реализована в рамках системы *Protégé.exe* (свободно распространяемая Java-программа). Система *Protégé.exe* позволяет работать с сетевым онтографом, так как классу не запрещено иметь двух родителей (*SubClfss of*). Определения и алфавитный список всех терминов занесены в комментарии классов. На рисунках 2 и 3 представлены определение термина «Странный аттрактор» и фрагмент онтографа.

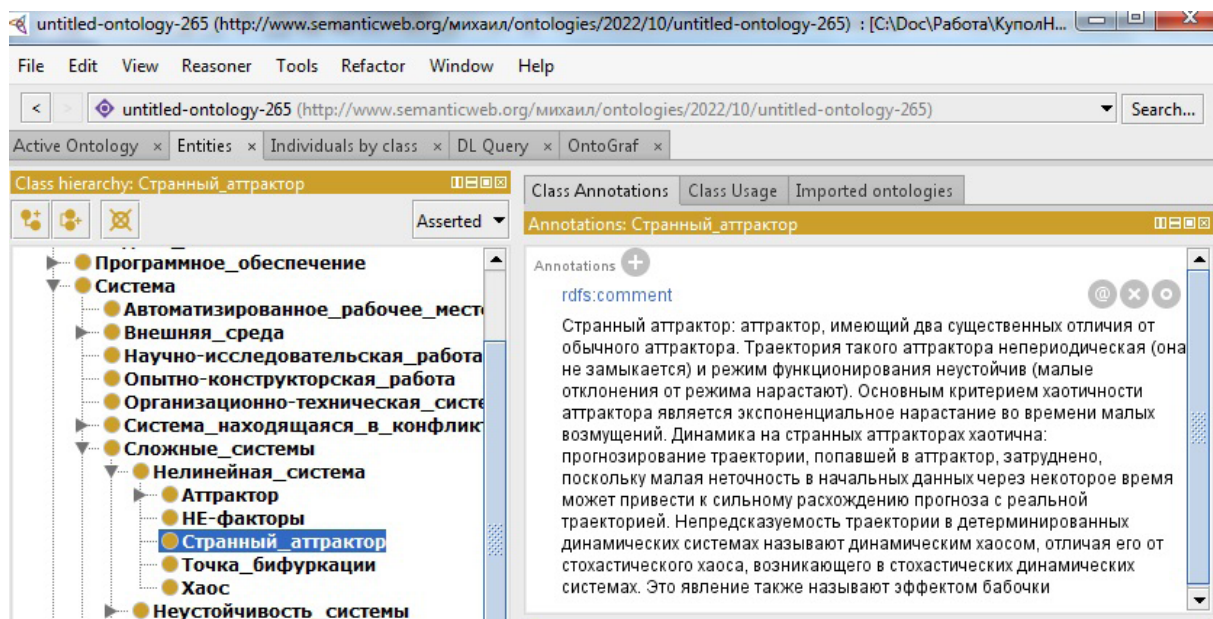


Рисунок 2 – Определение термина в комментарии

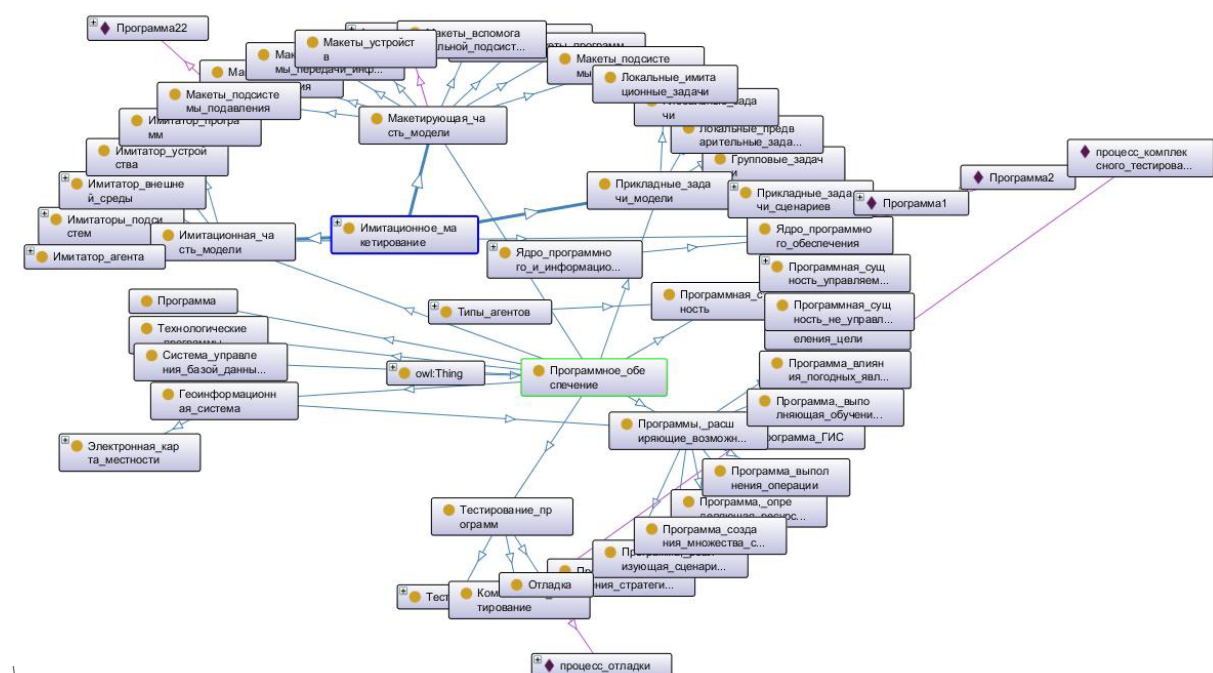


Рисунок 3 – Фрагмент онтографа

Машина вывода «Reasoner» контролирует непротиворечивость классов, проверку согласованности ограничений. С помощью закладки «DL Query» осуществляется поиск требуемого класса.

Работа с *Protégé.exe* предназначена для лабораторных исследований и реальной работы с имитационной моделью. В случае если требования заказчика не позволяют включить программу *Protégé.exe* в состав ПО, то, так как задействованы далеко не все ее функции, вместо программы *Protégé.exe* может быть использована программа, работающая с реляционными БД, включенными в поддержку технологии. В этом случае классы, экземпляры классов и другие понятия описываются в таблицах БД.

Обсуждение. Описанная выше модель онтологии была использована в процессе создания нескольких систем охраны особо важных объектов с замкнутыми и разомкнутыми границами от проникновения нарушителей. В режиме имитации в системах активно использовались сценарии проникновения.

Технологии, поддерживающие включение метода сценирования в работу систем, не могут ограничиваться только технологией имитационного макетирования. Кроме того, само имитационное макетирование может быть использовано не только для систем охраны, но и для систем другого класса, а также должно расширять свои возможности. Следовательно, должна развиваться соответствующая онтология подобных технологий.

Опыт создания онтологии показал следующее.

Для четкого понимания целей и задач разработчиков онтологии и соответствующей ей технологии включения метода сценирования необходимо начинать с создания формальной таксономии, в которую кроме используемых понятий и определений, должны быть включены основные принципы, положенные в основу описываемой технологии.

При описании понятий необходимо вводить новые определения, если нет соответствующих им традиционных.

После создания формальной таксономии следует расширить возможности онтологии для включения в нее со стороны пользователей описания характеристик объектов разрабатываемой системы, ее структуры, элементов, поддерживающих создание и тестирование ПО и ИО. Этим создается связь между описываемой технологией и разработкой конкретной системы, для которой технология используется.

Необходимо не усложнять онтологию, так как объем ресурсов, требуемых для ее создания, не должен превышать объема ресурсов, отводимых для создания описываемой технологии.

Функции программы, требующейся пользователям для работы с моделью онтологии, не должны быть сложными. Как правило, заказчик не приветствует включения в ПО системы сторонней программы, которой является *Protégé.exe*.

И, следовательно, будет необходимо создавать свою программу, работающую с таблицами БД онтологии.

Выводы. Метод сценирования нивелирует проблемы прогнозирования состояний современных сложных организационно-технических систем, находящихся в конкуренции. Включение метода сценирования в ПО и ИО разрабатываемых систем требует применения технологий, поддерживающих такое включение. Одна из таких технологий – технология имитационного макетирования, которая позволяет разработчикам системы включать алгоритмы метода сценирования на этапе проектирования и создания ПО, ИО системы. Однако при ее использовании пользователям технологии необходимо оставаться в рамках технологии, то есть соблюдать правила технологии, и одновременно выполнять техническое задание заказчика на разрабатываемую систему. Эффективно это позволяет осуществить онтология технологии, которая может быть достаточно просто реализована программой *Protégé.exe* или программным комплексом из состава поддержки технологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Красовский А.А. Проблемы физической теории управления // Автоматика и телемеханика. – 1990. – № 11. – С. 3-28.
2. Филимонов Н.Б. Методологический кризис «всепобеждающей математизации» современной теории управления // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – Т. 17. – № 5. – С. 291-299.
3. Попов И.М., Хамзатов М.М. Война будущего. М.: Кучково поле, 2019. – 832 с.
4. Дульнев П.А., Костокрызов А.И. О методическом подходе к оценке интегрального показателя эффективности управления формированиями Сухопутных войск в условиях имитационного моделирования общевойскового боя // Вестник академии военных наук. – 2019. – № 1 (66). – С. 35-42.
5. Горчица Г.И., Дульнев П.А., Ищук В.А. Проблемные вопросы и перспективы применения имитационного моделирования по обеспечению виртуальных войсковых испытаний создаваемых комплексов вооружения Сухопутных войск // Вестник академии военных наук. – 2020. – № 3(72). – С. 97-104.
6. Белотелов Н.В., Бродский Ю.И., Павловский Ю.Н. Сложность. Математическое моделирование. Гуманитарный анализ: Исследование исторических, военных, социально-экономических и политических процессов. М.: Либроком, 2019. – 320 с.
7. Иванов С.С., Педенко Н.П., Таняня О.С. Методологические основы описания процессов общевойскового боя при имитационном моделировании // Военная мысль. – 2020. – № 3. – С. 74-83.
8. Педенко Н.П., Капранов Р.В. Развитие методов компьютерного моделирования для создания моделей оценки боевых действий (по опыту зарубежных стран) // Вестник академии военных наук. – 2020. – № 3 (72). – С. 127-135.
9. Костров А.С. Метод построения программных средств моделирующих комплексов военного назначения // Программные продукты и системы. – 2021. – Т. 34. – № 3. – С. 440-447. DOI: 10.15827/0236-235X.135.440-447.
10. Чуркин И.П. Методологический анализ роли математического моделирования при принятии решений на вооруженную борьбу в воздушной сфере // Военная мысль. – 2022. – № 6. – С. 53-60.
11. Дульнев П.А., Котов А.В., Педенко Н.П. Прогнозирование хода и исхода общевойскового боя как метод теории общей практики // Военная мысль. – 2023. – № 2. – С. 28-37.
12. Корепанов В.О., Шумов В.В. Моделирование воен-

ных, боевых и специальных действий // Военная мысль. – 2023. – № 1. – С. 28-41.

13. Князева Е.Н., Курдюмов С.П. Основание синергетики. Синергетическое мировоззрение. М.: Либроком, 2018. – 254 с.

14. Юн Эльстер. Кислый виноград. М.: Институт Гайдара, 2018. – 296 с.

15. Кузнецов О.П. Ограниченная рациональность и принятие решений // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2019. – № 1. – С. 3-15.

16. Бабич М.Ю., Бабич А.М. Влияние аксиом принадлежности агентов нескольким организационно-техническим системам на рациональное поведение агентов // Искусственные общества. – 2021. – Т. 16. – вып. 1. URL: <https://artsoc.jes.su/S207751800013885-2-1> (дата обращения: 28.02.2023). doi: 10.18254/s207751800013885-2.

17. Бабич М. Ю. Искусственный интеллект и создание сложных организационно-технических систем (Часть II) // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2022. – № 1. – С. 32-41. doi:10.21685/2072-3059-2022-1-3.

18. Свердлик А.Г. Как эмоции влияют на абстрактное мышление и почему математика невероятно точна. М.: Ленанд, 2016. – 256 с.

19. Крис Ф. Мозг и душа. М.: АСТ, 2019. – 335 с.

20. Лакофф Дж., Джонсон М. Метафоры, которыми мы живем. М.: Едиториал, 2004. – 256 с.

21. Ришар Ж.Ф. Ментальная активность. Понимание, рассуждение, нахождение решений. М.: Институт психологии РАН, 1998. – 232 с.

22. Губинский А.М. Управление технологическим развитием в сфере обороны и безопасности России, США, Китая: исторические аспекты и современный опыт (в 3 томах): Том II. США. М.: Издательские решения. – 2021. – 710 с.

23. Воробьев И.Н. Еще раз о военной футурологии // Военная мысль. – 2020. – № 5. – С. 51-57.

24. Коржевский А.С., Махнин В.Л. Методологические подходы к прогнозированию в сфере военной безопасности государства // Военная мысль. – 2022. – № 5. – С. 21-31.

25. Барановский В.Г., Кобринская И.Я., Уткин С.В., Фрумкин Б.Е. Метод ситуационного анализа как инструмент актуального прогнозирования в условиях трансформации миропорядка // Вестник МГИМО-Университета. – 2019. – № 12 (4). – С. 7-23.

26. Переслегин С. Новые карты будущего или Анти-Рэнд. М.: АСТ, 2009. – 701 с.

27. Бабич М.Ю., Бахтияров Р.Ж., Гришанин Е.Г., Кузнецов В.Е., Чувазов А.А. Имитационное макетирование для специализированных организационно-технических систем // Радиопромышленность. – 2021. – Т. 31. – № 1. – С. 56-64. doi: 10.21778/2413-9599-2021-31-1-56-64.

28. Бабич М.Ю., Кузнецов В.Е., Бабич А.М. Имитация особенностей автоматизированных систем управления для силовых структур в процессе моделирования их функционирования // I-methods. – 2022. – Т. 14. – № 4. URL: <http://intech-spb.com/wp-content/uploads/archive/2022/4/1-babich4-2022.pdf> (дата обращения: 11.04.2023)

29. Бабич М.Ю., Кузнецов В.Е. Метод прецедентов в многоагентной конкурирующей среде // Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике. XXII Международная научно-техническая конференция. Сборник статей. Пенза, 2022. – С. 5-14.

30. Смирнов А.В., Левашова Т.В., Пономарев А.В. Онтологическая модель поддержки принятия решений на основе человеко-машинного коллективного интеллекта // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2020. – № 3. – С. 48-60. doi: 10.14357/20718594200305.

31. Еремеев А.П., Мунтян Е.Р. Разработка онтологии на основе графов с множественными и разнотипными связями // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2021. – № 3. – С. 3-18. doi: 10.14357/20718594210301.

Статья поступила в редакцию 19.10.2023

Статья принята к публикации 15.12.2023

УДК 004.4

EDN: HOJPRI

**ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ
МАКЕТИРОВАНИЯ И ОТЛАДКИ ДАТЧИКО-ПРЕОБРАЗУЮЩЕЙ АППАРАТУРЫ**

© Авторы 2023

SPIN: 2454-0080

AuthorID: 472534

ORCID: 0009-0009-8254-9606

ЧЕРНЕЦКАЯ Ирина Евгеньевна, доктор технических наук, доцент,

заведующий кафедрой «Вычислительная техника»

Юго-Западный государственный университет

(305004, Россия, г. Курск, ул. Челюскинцев, д. 19/2, e-mail: vt.swsu@yandex.ru)

SPIN: 5470-1289

AuthorID: 650911

ORCID: 0000-0002-3358-4394

МАРТЫШКИН Алексей Иванович, кандидат технических наук, доцент,

заведующий кафедрой «Программирование»

Пензенский государственный технологический университет

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

SPIN: 7126-7682

AuthorID: 428445

ORCID: 0000-0003-3176-0531

САЛЬНИКОВ Игорь Иванович, доктор технических наук, профессор,

профессор кафедры «Программирование»

Пензенский государственный технологический университет

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

SPIN: 9743-8350

AuthorID: 885871

ORCID: 0000-0003-4114-7036

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

Пензенский государственный технологический университет

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

Аннотация. Статья посвящена разработке программного модуля информационно-вычислительной системы для макетирования и отладки датчико-преобразующей аппаратуры на базе программируемых аналоговых интегральных схем (ПАИС). Рассматривается применение ПАИС в контексте высокоточной обработки аналоговых сигналов в системах с повышенными требованиями к быстродействию. Описаны этапы разработки и реализации программного модуля измерительного блока на базе микроконтроллера и ПАИС, освещены аспекты конфигурирования ПАИС и интеграции с микроконтроллером для оптимизации процесса разработки. Особенностью представленного подхода является использование специализированного программного обеспечения *AnadigmDesigner2* для создания аналоговых схем, что существенно упрощает процесс проектирования и сокращает временные и трудовые затраты. Обсуждаются потенциальные области применения разработанного устройства в различных специализированных системах для создания макетов и отладки схем преобразователей. Разработка окажется полезной в индустрии, особенно в сферах, где требуется точная и быстрая обработка аналоговых сигналов.

Ключевые слова: аналоговый сигнал, датчико-преобразующая аппаратура, микроконтроллер, программный модуль, протокол, цифровой сигнал, ПАИС, ПЛИС, УАПП

**SOFTWARE MODULE OF THE INFORMATION-COMPUTING SYSTEM FOR PROTOTYPING AND
DEBUGGING OF SENSOR-TRANSFORMING EQUIPMENT**

© The Author 2023

CHERNETSKAYA Irina Evgenievna, doctor of technical sciences, associate professor,

head of the Department of Computer Science

Southwestern State University

(305004, Russia, Kursk, Chelyuskintsev Street, 19/2, e-mail: vt.swsu@yandex.ru)

MARTYSHKIN Alexey Ivanovich, candidate of technical sciences, docent, head of Programming Department

Penza state technological University

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

SALNIKOV Igor Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, professor of Programming Department

Penza State Technological University

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

DANILOV Evgeny Alexandrovich, candidate of technical sciences, associate professor of Programming Department
Penza State Technological University

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

Abstract. The article is devoted to the development of the software module of the information-computer system for prototyping and debugging of sensor-converting equipment based on programmable analogue integrated circuits (PAICs). The application of PAIC in the context of high-precision processing of analogue signals in systems with increased requirements to speed is considered. The stages of development and implementation of the measuring unit software module on the basis of microcontroller and PAIC are described, the aspects of PAIC configuration and integration with microcontroller for optimization of the development process are highlighted. The peculiarity of the presented approach is the use of specialized software *AnadigmDesigner2* for creation of analogue circuits, which significantly simplifies the design process and reduces time and labour costs. Potential applications of the developed device in various specialized systems for creating layouts and debugging converter circuits are discussed. The development will be useful in industry, especially in areas where accurate and fast processing of analogue signals is required.

Keywords: analog signal, sensor-converter hardware, microcontroller, software module, protocol, digital signal, PAIS, FPGA, UAPP.

Для цитирования: Чернецкая И.Е. Программный модуль информационно-вычислительной системы для макетирования и отладки датчиков-преобразующей аппаратуры / И.Е. Чернецкая, А.И. Мартышкин, И.И. Сальников, Е.А. Данилов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 12. – № 4(64). – С. 19-28. – EDN: HOJPRI.

Введение. Сегодня в электронике отмечается рост популярности интегральных микросхем с программно-настраиваемой конфигурацией. Сегодня применение интегрированных схем с ядрами интеллектуальных свойств (IP), основанными на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС), находят широкое применение в различных областях науки и техники [1, 2]. В таких системах вычислительные операции распределяются так, чтобы процессор выполнял управляющие алгоритмически сложные функции и относительно медленные вычисления. Задачи, требующие высокой скорости выполнения, аппаратно реализуются на ресурсах ПЛИС и программируемых аналоговых интегральных схем (ПАИС) [3, 4]. ПАИС демонстрируют высокую эффективность при построении PID-регуляторов, аналоговых фильтров высокого порядка, а также при разработке сложных аналоговых нейронных сетей. Основным инструментом при проектировании на ПАИС стал де-факто программно-аппаратный комплекс *AnadigmDesigner2* [5], который включает в себя полный набор специально разработанных для проектирования сложных аналоговых схем библиотек и инструментов, предоставляя инженерам и дизайнерам эффективные средства для проектирования аналоговых устройств в сокращенные сроки.

Целью статьи является создание универсального программно-аппаратного модуля на базе ПАИС для макетирования и отладки датчиков-преобразующей аппаратуры. Предложенный метод разработки модуля предоставляет возможность достижения улучшений в точности для множества практических сценариев при сравнительно непритязательной аппаратной реализации. Особенно практика с использованием ПАИС экономически оправдана на этапах макетирования разрабатываемых изделий датчиков-

преобразующей аппаратуры.

Задачей настоящего исследования является разработка программного модуля измерительного блока на базе микроконтроллера (МК) и ПАИС для макетирования и отладки датчиков-преобразующей аппаратуры. Аналоговый измерительный блок выполнен на ПАИС *AN221E04* фирмы *Anadigm* [6]. МК *STM32F042*, являющийся составной частью устройства, содержит программный модуль, управляющий измерительным блоком и связывающий измерительный блок с компьютером, обрабатывающим результаты измерений.

Измерительный блок информационно-вычислительной системы на базе ПАИС, конфигурируемый МК, отвечает за измерение параметров аналогового сигнала с учетом протокола *MOD-BUS-RTU*. Для этого необходимо разработать текстовое описание программного модуля МК на языке *Cu*, а также проект конфигурации ПАИС в среде *AnadigmDesigner2*. Информацию об использованном в настоящей статье порядке разработки программного обеспечения в средах *Qt*, *C++*, *C* можно найти в литературе [7-9].

Методология. В ходе исследования ставилась задача разработать программный модуль измерительного блока для подключения к ПЭВМ через интерфейс *RS-485* [10], имеющий входную аналоговую часть, реализованную на базе ПАИС [11]. Для создания универсальной реконфигурируемой системы с использованием программного модуля лучше всего подходят программируемые интегральные схемы, среди которых для разработки измерительного блока стоит сравнить два возможных варианта реализации измерительного блока с использованием цифровой и аналоговой программируемых интегральных схем.

Достоинства ПЛИС проявляются в возможнос-

ти создавать разнообразные цифровые устройства с использованием развитых инструментов проектирования [12, 13].

На рисунке 1 показана упрощенная структурная схема измерительного блока на базе ПЛИС, в этой структуре для преобразования аналоговых сигналов требуются внешние цифроаналоговый и аналогово-цифровой преобразователи (ЦАП и АЦП). Это приводит к увеличению габаритов, энергопотребления и стоимости конечного изделия.

В ПАИС используются схемы на основе переключаемых конденсаторов. Аналоговые сиг-

налы поступают через универсальные входные ячейки, затем они обрабатываются при помощи конфигурируемых аналоговых модулей (КАМ), которые включают в себя различные компоненты для формирования аналоговых компараторов и источников эталонных напряжений, а также АЦП и других функциональных узлов [14]. Эта система обеспечивает разносторонний и гибкий подход к обработке аналоговых сигналов внутри ПАИС, что позволяет эффективно адаптировать его к различным приложениям. Структурная схема измерительного блока, базирующегося на ПАИС, представлена на рисунке 2.

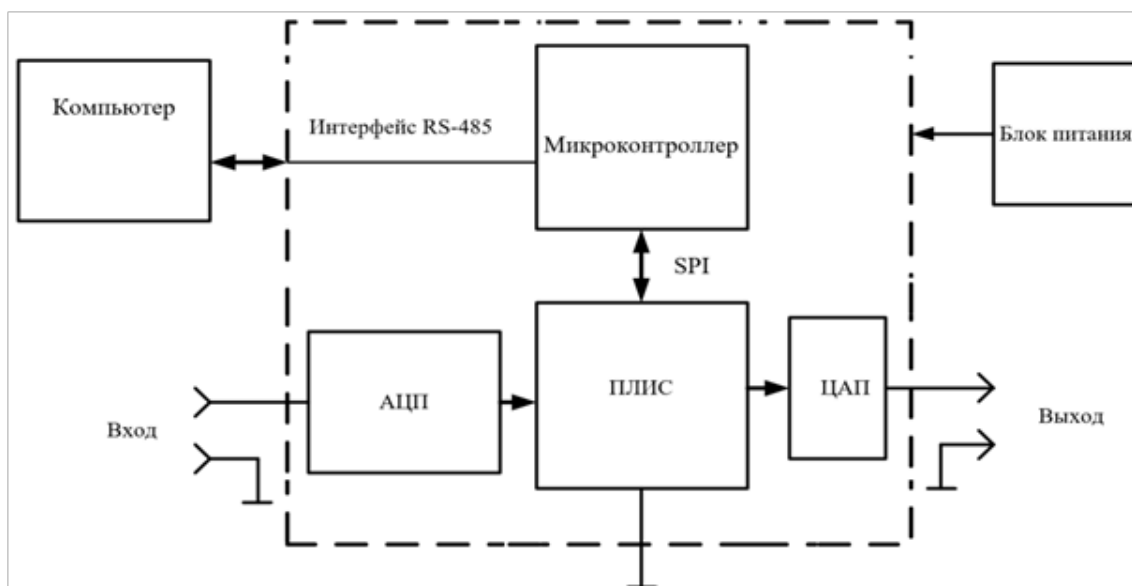


Рисунок 1 – Структура измерительного блока на базе ПЛИС

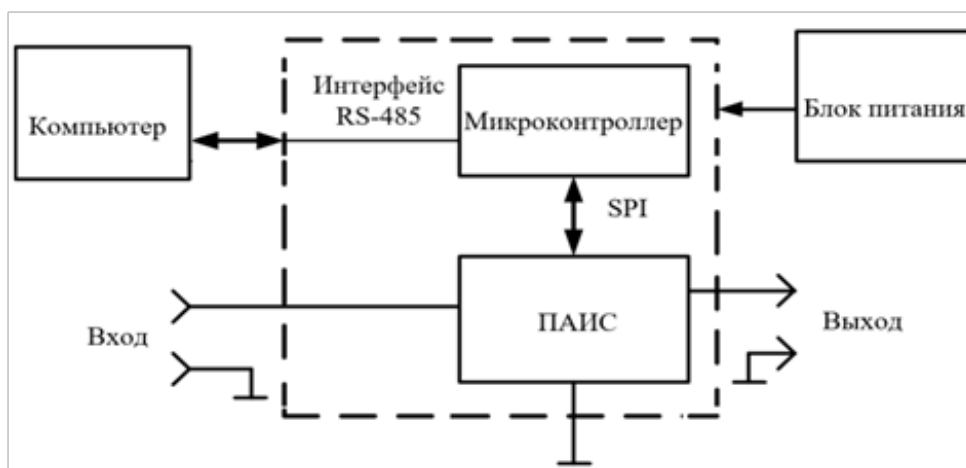


Рисунок 2 – Структура измерительного блока на базе ПАИС

Для реализации разрабатываемого устройства целесообразно использовать ПАИС второго поколения AN221E04 от компании Anadigm [6]. Следует заметить, что, в отличие от цифровых систем, в дискретно-аналоговых ПАИС сигнал не квантован по уровню, поэтому при надлежащей частоте дискретизации после обработки он может быть восстановлен с абсолютной точностью. Для

передачи в компьютер результатов измерения и получения команд управления необходим МК [15, 16] с встроенными АЦП и универсальным асинхронным приемопередатчиком (УАПП). Потребуется также специальный приемопередатчик, отвечающий за преобразование сигналов УАПП в интерфейс RS-485.

Таким образом, для решения поставленной задачи оправдано применение технологии ПАИС, в

которой однако для хранения конфигурационной информации используется ОЗУ, не сохраняющее информацию при отключении питания. По этой причине для хранения конфигурации ПАИС целесообразно применить МК со встроенным ПЗУ. Передача конфигурационных данных и управление ПАИС при этом может осуществляться посредством МК с использованием встроенного аппаратного

контроллера последовательной шины *SPI* и портов ввода/вывода, аппаратные блоки которых также содержатся в большинстве серий МК [17, 18].

С учетом таких рассуждений структурную схему устройства можно представить в виде, приведенном на рисунке 3, функциональная схема устройства с указанием типов микросхем показана на рисунке 4.

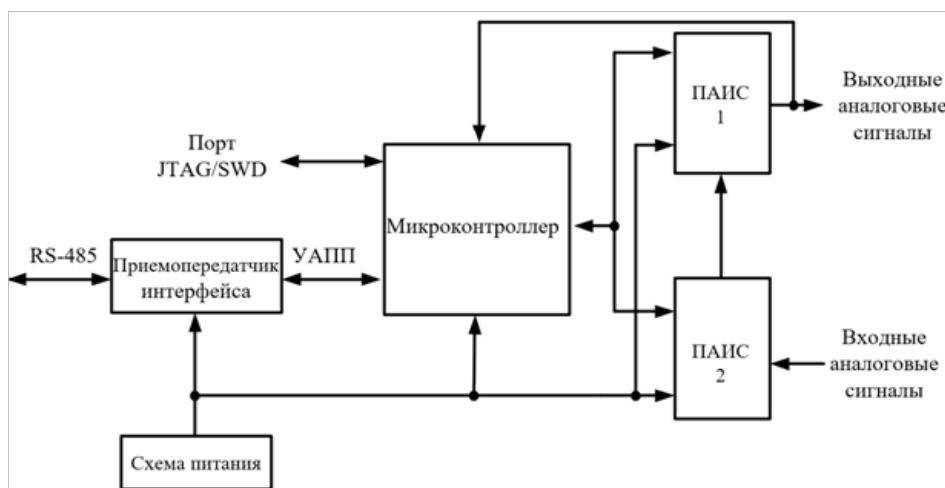


Рисунок 3 – Структурная схема устройства

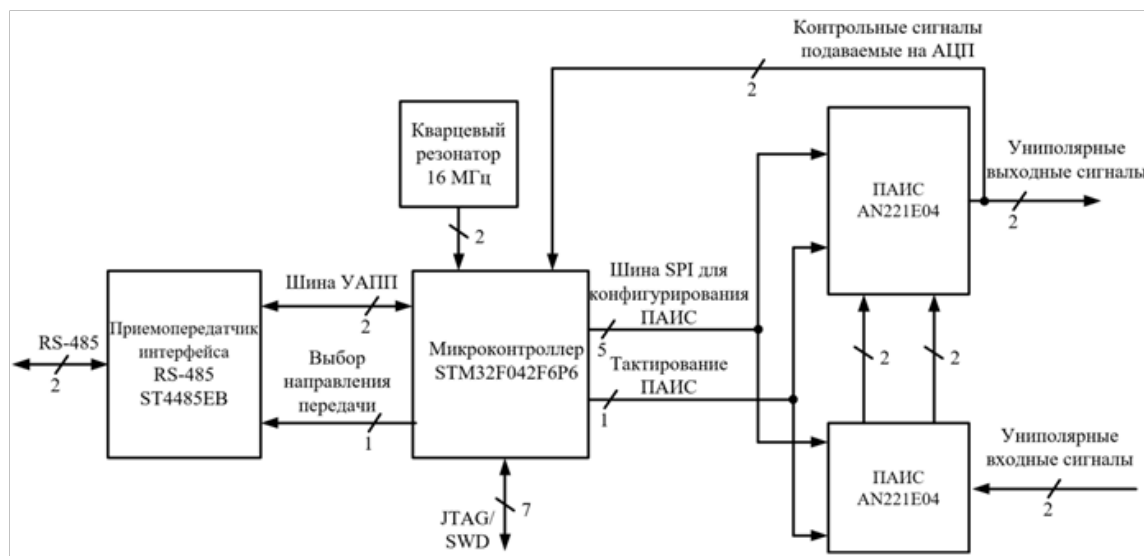


Рисунок 4 – Функциональная схема устройства

В состав электрической функциональной схемы входят:

- приемопередатчик *RS-485 ST4485EB* фирмы *STMicroelectronics*;
- ПАИС *AN221E04* фирмы *Anadigm*;
- 32-битный МК *STM32F042* фирмы *STMicroelectronics*;
- кварцевый генератор 16 МГц;
- МК, содержащий микропрограмму управления измерительным блоком, а также средства связи с компьютером.

Функции модуля с микропрограммным обеспечением (МПО) сводятся к следующему:

- установка на прием приемопередатчика;
- формирование сигнала сброса ПАИС длительностью 100 мс;
- загрузка конфигурационного кода в ПАИС;
- тактирование ПАИС;
- установка начальных условий работы ПАИС;
- циклическое включение АЦП для измерения показаний датчика и заполнения оперативного буфера;
- передача сведений о состоянии устройства и измерительных данных по запросу приемного канала.

Результаты. В качестве МК, исполняющего МПО, выбрана микросхема *STM32F042*, распола-

гающая подходящим количеством портов ввода-вывода, достаточным числом ПЗУ для хранения МПО и конфигураций двух ПАИС, а также всеми необходимыми встроенными аппаратными блоками входных/выходных данных (АЦП, УАПП, *SPI*). Для реализации протокола связи на физическом уровне выбрана микросхема приемопередатчика *ST4485EB*. Преимущество данной микросхемы приемопередатчика заключается в полном соответствии стандарту *RS-485*, высокой скорости передачи данных (до 20 Мбит/с) и простоте подключения, т.к. данная микросхема не требует использования накопительных конденсаторов и имеет полностью электрически совместимый интерфейс с МК. Аналоговые схемы строятся на базе ПАИС *AN221E04*, свободно распространяемое программное обеспечение которой *AnadigmDesigner2* с гибким интерфейсом и встроенной библиотекой конфигурируемых компонентов обеспечивает быстрое и простое конструирование аналоговых схем. Кроме того, интерфейс ПАИС позволяет строить сложные аналоговые схемы из нескольких последовательно включенных микросхем ПАИС.

Реализация протокола связи на физическом уровне соответствует стандарту *RS-485*, линии связи выполнены витыми парами проводов, принятая топология сети – «точка-точка», скорость обмена

информацией – не менее 115200 бит/с, режим работы – полудуплексный. При реализации следует предусмотреть возможность выбора пользователем скорости обмена информацией из ряда 1200, 2400, 4800, 9600, 19200, 38400, 58600, 115200 бит/с. Определение способа задания скорости (программирование или установка перемычек) остается за разработчиком. С целью уменьшения влияния помех на линию связи с ПЭВМ следует предусмотреть возможность подключения к концу линии резистор-терминатора и резисторов цепей смещения.

Сопряжение ПАИС с МК. Уникальной особенностью ПАИС *Anadigm* является развитый конфигурационный интерфейс, обеспечивающий упрощение и ускорение процесса загрузки данных в микросхему. Этот интерфейс также допускает использование разнообразных источников конфигурационных данных от стандартных ПЗУ до микропроцессоров. Спроектированный для передачи в конфигурационное ОЗУ данных о межсоединениях конфигурационный интерфейс дает возможность автоматической загрузки конфигурации как из внешней микросхемы *EEPROM*, так и через МК посредством *SPI*, *SSI* или микропроцессорной шины данных. На схеме, представленной на рисунке 5, показано соединение двух ПАИС *Anadigm AN221E04* для конфигурирования посредством *SPI*-интерфейса.

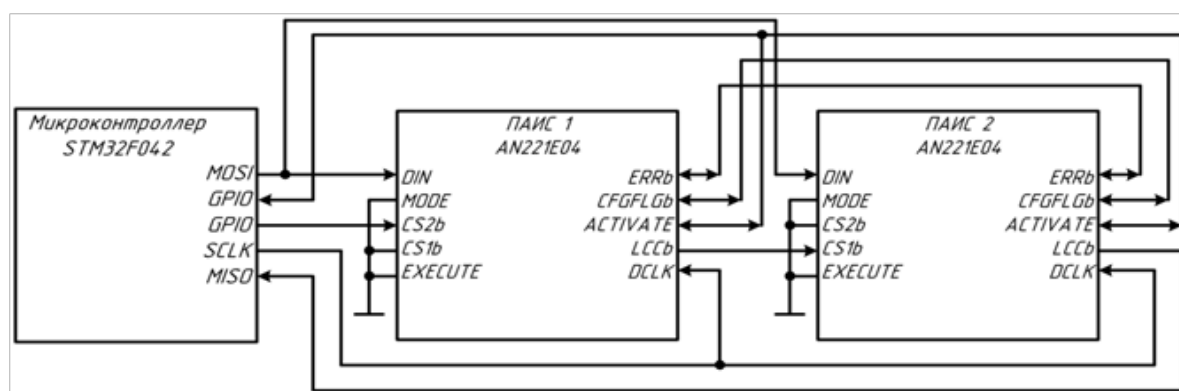


Рисунок 5 – Подключение двух ПАИС AN221E04 к МК для конфигурирования через интерфейс SPI

При включении питания ПАИС начинается процесс инициализации, внутренний сигнал сброса стирает прежнюю информацию в памяти. Появление логической «1» на выходе *CFGFLGb* свидетельствует о завершении этапа инициализации и готовности устройства к конфигурированию. После того, как МК выработает сигнал выбора кристалла *CS2b* для активации микросхемы ПАИС 1, начинается передача данных по линии *DIN*. Уникальный механизм последовательной передачи данных в ПАИС 1 и ПАИС 2 предусматривает выработку сигнала выбора следующей ПАИС по ее входу *CS1b* по завершении полной загрузки конфигурационных данных в данную ПАИС. Тем временем каждой микросхеме в цепи присваиваются два уникальных адреса – *ADDR1* или *ADDR2*, причем *ADDR1* – уникальный

идентификатор для каждого устройства в данной цепи. После передачи конфигурационных данных МК получает уведомление (*LCCb*) о завершении процесса конфигурирования от последнего звена в цепи ПАИС. Установившийся логический уровень «1» на шине *ACTIVATE* свидетельствует о готовности всех микросхем к приему обновленных конфигурационных данных.

Для модификации аналоговой схемы управляющий МК должен загрузить предварительно скомпилированные данные конфигурации в ПАИС, используя конфигурационный протокол. Эти данные создаются при помощи САПР *AnadigmDesigner2*. Одним из значимых преимуществ конфигурационного интерфейса ПАИС является встроенная система диагностики, которая выявляет ошибки в

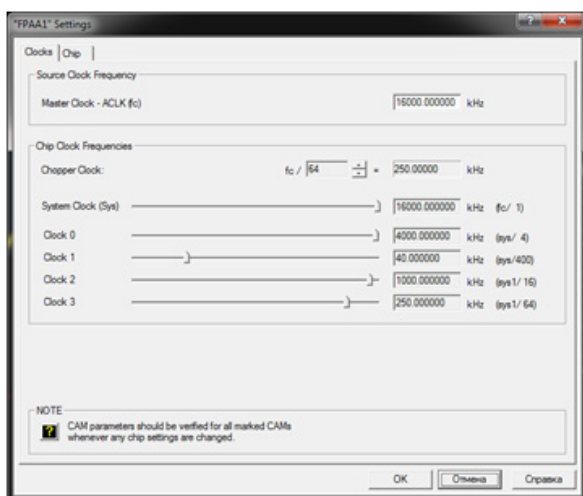
процессе загрузки конфигурационных данных и автоматически выполняет их повторную загрузку.

Моделирование проекта в САПР *AnadigmDesigner2* дает разработчикам мощный инструмент оценки функциональности схем, не прибегая к их физическому макетированию. Процесс моделирования в *AnadigmDesigner2* аналогичен этапам обычного макетирования, что облегчает переход от разработки схемы к оценке ее работы. Независимо от уровня подготовки пользователя программное обеспечение позволяет быстро создавать сложные аналоговые схемы и проверять их работоспособность. В процессе моделирования разработчик может оптимизировать схему, после чего загрузить ее конфигурацию в ПАИС для проведения натурных испытаний. Этот подход позволяет упростить процесс разработки электронного устройства, сократить время от идеи до физического воплощения. В процессе проектирования нужно выбрать микросхему *AN221E04*, задать ее параметры и приступить к формированию аналоговой структуры. Реализация проекта в среде *AnadigmDesigner2* включает выполнение следующих шагов:

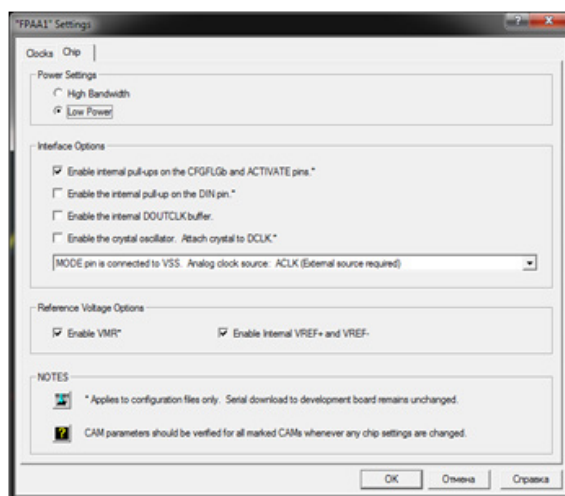
1. Настройка параметров платы.

2. Выбор, настройка и размещение кристаллов КАМ внутри схемы.
3. Подключение и настройка кристаллов КАМ.
4. Установка соединений между кристаллами КАМ и ячейками ввода/вывода.
5. Настройка параметров разработанной схемы перед запуском процесса моделирования.
6. Загрузка конфигурационных данных в ПАИС.

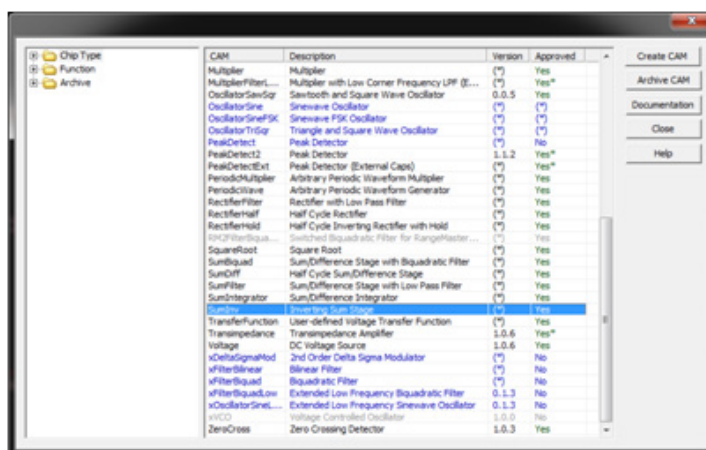
Для создания проекта необходимо выполнить следующие действия: выбрать в меню опцию «File» → «New». После этого в пункте «Settings» выбрать пункт «ActiveChipsettings...». В открывшемся окне перейти на вкладку «Clocks» в разделе «MasterClock» и установить значения частот, как показано на рисунке 6а ввиду того, что все вычисления программируемых параметров зависят от частоты синхронизирующего сигнала схемы на переключаемых конденсаторах, определяемого данной частотой. Дополнительные параметры ПАИС настраиваются во вкладке «Chip», включая элементы управления энергопотреблением, подтягивающие резисторы и конфигурирование ПЗУ, согласно рисунку 6б. Для выбора КАМ следует нажать на клавиатуре символ «t», как показано на рисунке 6в.



а)



б)



в)

Рисунок 6 – Установка значений частот (а); настройка дополнительных параметров (б); выбор генераторов стандартных сигналов (в)

Для выбора инвертирующего сумматора с использованием полосы прокрутки справа, следует выделить курсором мыши и выполнить щелчок левой кнопкой. После этого, при нажатии кнопки "Create CAM" или клавиши *Enter*, вокруг курсора появится светлое очертание выбранного инвертирующего сумматора, свидетельствуя о его готовности к размещению в поле первого программируемого аналогового устройства (FPAА1), представленном на экране разработки (рис. 7). После размещения инвертирующего сумматора в необходимом месте, появится окно "Set CAM Parameters", предназначенное для настройки параметров данного инвертирующего сумматора. Перечень параметров зависит от настроек в разделе "Settings" → "Preferences..." на вкладке «CAM». Содержимое окна "Set CAM Parameters" зависит от типа выбранного инвертирующего сумматора, но в общем включает все доступные пользователю настройки для данного модуля. Для инвертирующего сумматора рекомендуется установить параметры

усиления для каждого входа равными единице. В элементе управления выбирается одно из четырех значений частоты внутреннего генератора, например, 4000 кГц. После нажатия кнопки «ОК» указанные параметры будут применены, и окно автоматически закроется.

Аналогичным образом проводим размещение КАМ биквадратного фильтра в области второй ПАИС (FPAА2), представленного на экране разработки. По факту успешного размещения биквадратного фильтра в нужном месте (рис. 8), появится окно "Set CAM Parameters", в которых нужно задать параметры фильтрации нижних частот. Для достижения выходного усиления, равного единице, нужно установить частоту среза на уровне 200 Гц, а добротность – 0,707. В элементе управления для выбора одного из четырех значений частоты внутреннего тактового генератора выбираем 64 кГц. После того как будут установлены необходимые параметры, нажмите кнопку "ОК" для их применения.

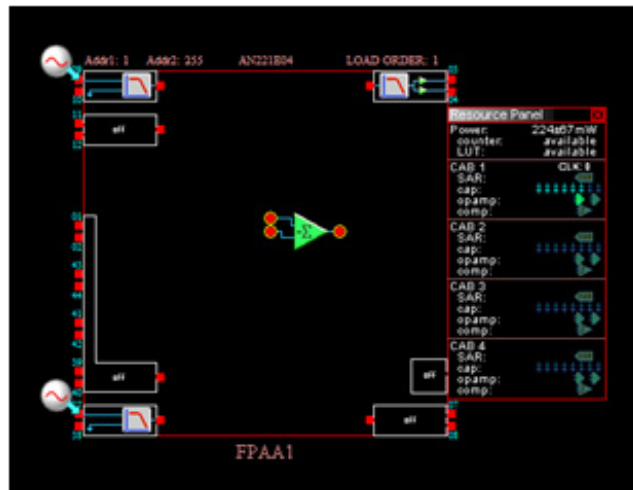


Рисунок 7 – Установка КАМ инвертирующего сумматора



Рисунок 8 – Установка КАМ биквадратного фильтра

Для маршрутизации схемы используется функциональность, активируемая клавишей "w" на клавиатуре. При этом курсор мыши принимает вид карандаша, обозначая готовность. Сам процесс

проведения соединений осуществляется с использованием левой кнопки мыши. Осуществим маршрутизацию соединений между добавленными КАМ и входами/выходами ПАИС. Обеспечим

соединение обеих ПАИС в соответствии с рисунком 9. На вход «InputCell1» (FPAА1) установим однополярный генератор синусоидального сигнала с частотой 100 Гц, амплитудой 100 мВ и смещением 2 В. На вход «InputCell3» (FPAА1) установим однополярный генератор синусоидального сигнала с частотой 5 КГц, амплитудой 100 мВ и смещением

2 В. Входы «InputCell1» (FPAА1) и «InputCell3» (FPAА1) переведем в однополярный режим.

Для проведения проверки работоспособности аналоговой схемы в программе активирована вкладка симуляции, что инициировало появление окна симуляции. В данном окне представлены осциллограммы сигналов, изображенные на рисунках 10, 11.

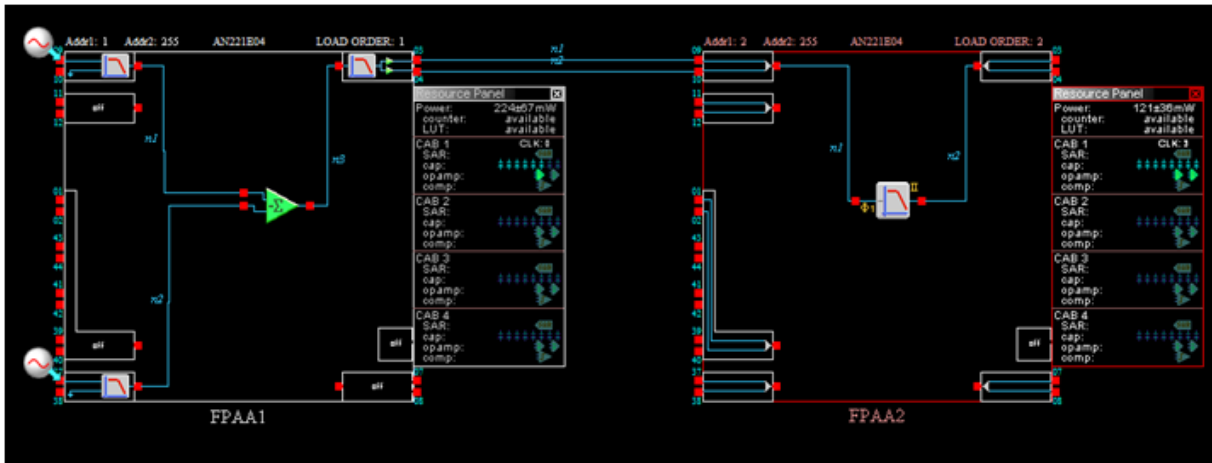


Рисунок 9 – Соединение КАМ внутри ПАИС

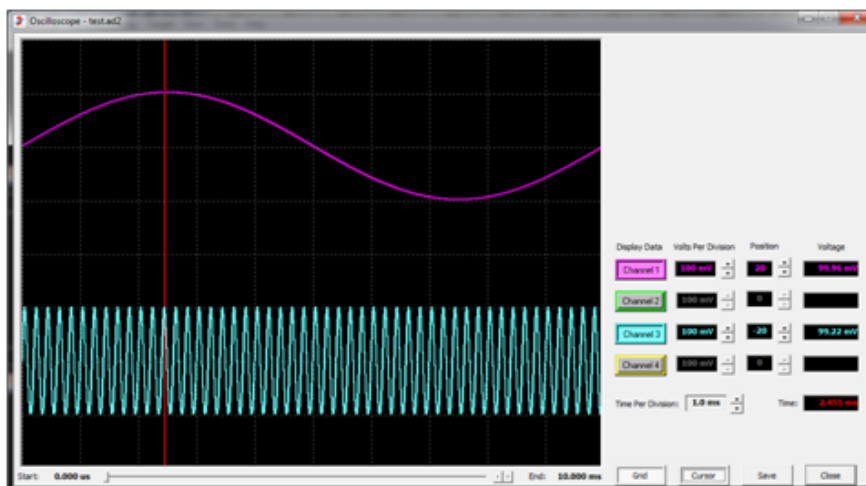


Рисунок 10 – Окно осциллограмм входных сигналов

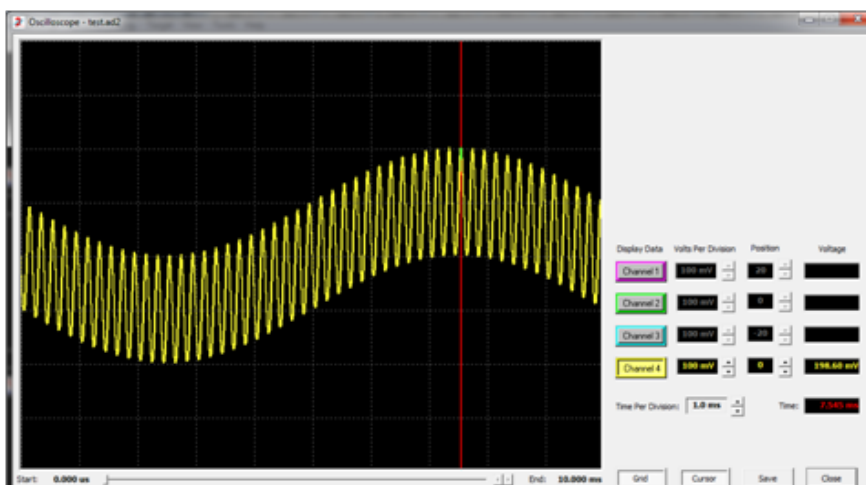


Рисунок 11 – Окно осциллограммы суммированных входных сигналов

В процессе конфигурирования ПАИС производит поиск байта синхронизации 0xD5 на шине данных *DIN*, за которым следует байт логического адреса *ADDR1*. При обнаружении совпадения адреса передаваемых данных с адресом, полученным в процессе конфигурирования, ПАИС устанавливает уровень «0» на шине *ACTIVE*. На прикладном уровне связь с МК реализуется по протоколу «*MODBUS-RTU*» согласно «*MODBUS APPLICATION PROTOCOL SPECIFICATION V1.1b3*», размещенному на Интернет-ресурсе «http://www.modbus.org/docs/Modbus_Application_Protocol_V1_1b3.pdf». МК откликается либо на обращения, содержащие его сетевой адрес в заголовке, либо на обращения с широковещательным адресом. Для чтения данных

используются функции «(0x03) *Read Holding Registers*», для записи одного 16-битного слова данных используется функция «06 (0x06) *Write Single Register*», для записи нескольких 16-битных слов данных за одну транзакцию используется функция «16 (0x10) *Write Multiple registers*». При возникновении ошибок в процессе обработки запроса или при получении запроса на чтение/запись данных по несуществующему адресу МК возвращает посылку, содержащую код ошибки. МК обеспечивает время отклика на изменение измеряемой физической величины не более 10 мс.

При разработке программного обеспечения МК были реализованы регистры «*MODBUS*» согласно таблице 1.

Таблица 1 – Карта регистров МК

Адрес DEC	Адрес HEX	Наименование	Примечание
1	00 01h	Тип ПО МК	например, 0101
2	00 02h	Номер версии ПО МК	например, 0001
3	00 03h	Серийный номер устройства	старшая часть
4	00 04h		младшая часть
5	00 05h	Дата изготовления устройства	ГГ ГГ
6	00 06h		ММ ДД
7	00 07h	Слово состояния устройства	рабочее состояние, 1
8	00 08h	Напряжение питания МК (x100)	например, 12,34 В -> 1234
9	00 09h	Температура МК (x100)	например, 36,6 °С -> 3660
10	00 0Ah	Напряжение первого измерительного канала, В (x100)	старшая часть
11	00 0Bh		младшая часть
12	00 0Ch	Напряжение второго измерительного канала, В (x100)	старшая часть
13	00 0Dh		младшая часть

Обсуждение. Предложена методика создания программного модуля информационно-вычислительной системы для макетирования и отладки датчиков-преобразующей аппаратуры. Разработана структура программного модуля измерительного блока на базе МК и ПАИС, приведен пример проектирования конфигурации ПАИС в среде *AnadigmDesigner2*. Результаты компьютерного эксперимента подтверждают возможность использования предложенного программного модуля на практике.

Выводы. Разработан программный модуль измерительного блока на базе МК и ПАИС, предназначенный для макетирования и отладки датчиков-преобразующей аппаратуры. Входная аналоговая часть измерительного блока реализована на ПАИС *AN221E04* фирмы *Anadigm*. Микроконтроллер *STM32F042*, являющийся составной частью модуля управления, содержит программный модуль для управления измерительным блоком, а также для связи с компьютером, осуществляющим общее управление модулем и воспринимающим для обработки результаты измерения. Реализация протокола связи соответствует стандарту *RS-485*.

Измерительный блок, включающий входную аналоговую часть на базе ПАИС, реализует конфигурирование ПАИС с помощью МК, алгоритм измерения параметров аналогового сигнала и поддер-

живает протокол *MODBUS-RTU*. Разработаны текстовое описание программного модуля МК на языке Си, а также проект конфигурации ПАИС в среде *AnadigmDesigner2*.

Разработанное устройство предназначено для использования в специализированных системах, предназначенных для создания схем и отладки аппаратуры датчиков и вторичных преобразователей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Тарасов И.Е. Разработка цифровых устройств на основе ПЛИС Xilinx с применением языка VHDL. М.: Горячая линия-Телеком, 2021. – 252 с.
2. Харрис Д.М., Харрис С.Л. Цифровая схемотехника и архитектура компьютера. – М.: ДМК Пресс, 2018. – 792 с.
3. Троицкий А.М. Методы тестирования и отладки ПЛИС. Инструменты проектирования ПЛИС // Research success 2021: Сборник статей Международного научно-исследовательского конкурса. Петрозаводск, 2021. – С. 36-44.
4. Гребенко Ю.А. Проектирование комплексных полосовых фильтров на базе программируемых аналоговых интегральных схем / Ю.А. Гребенко, Ко.М. Аунг // Электросвязь. – 2020. – № 8. – С. 57-60.
5. Система автоматизированного проектирования программируемых аналоговых интегральных схем *Anadigm-Designer2*. Часть 1.1. Знакомство с интерфейсом - Компоненты и технологии [Электронный ресурс]. – URL: <https://kit-e.ru/anadigm-designer-2-chast-1-1/?ysclid=lpjvj0cxm5779134083> (дата обращения: 20.08.2023).
6. Минина К.А. Реализация аналоговой части флюориметра на основе микросхемы *Anadigm* / К.А. Минина, Д.В. Корнилин // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: Материалы Всероссийской научно-

технической конференции. Под редакцией А.И. Данилина, 2018. – С. 192-194.

7. Шлее М. Qt 5.10. Профессиональное программирование на C++. – СПб.: БХВ-Петербург, 2018. – 1072 с.

8. Шилдт Г. С.: полное руководство, классическое издание: [перевод с английского] / Герберт Шилдт. – Москва [и др.]: Вильямс, 2018. – 699 с.

9. Харрис Сара Л., Харрис Дэвид М. Цифровая схемотехника и архитектура компьютера. Дополнение по архитектуре ARM. – Москва: ДМК Пресс, 2018. – 356 с.

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

11. Roel D.D., Kumar M. Design and Implementation of Higher Order Sigma Delta Modulator Circuits Using FPAА // Analog Integrated Circuits and Signal Processing. – 2020. – Т. 104. – № 2. – С. 169-182.

12. Тарасов И.Е. ПЛИС Xilinx. Языки описания аппаратуры VHDL и Verilog, САПР, приемы проектирования. М.: Горячая линия-Телеком, 2023. – 538 с.

13. Ермаков М.В. Разработка проекта ПЛИС для приема обработанного аналогового сигнала от АЦП // Студенческий вестник. – 2023. – № 22-9 (261). – С. 42-46.

14. Ковров А.И. Реализация динамического управления реконfigurацией ПАИС // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тезисы докладов двадцать седьмой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. Москва, 2021. – С. 41.

15. Ян Л.П. Динамическая перестройка центральной частоты комплексного полосового фильтра на базе ПАИС с помощью микроконтроллера // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тезисы докладов Двадцать восьмой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. Москва, 2022. С. 40.

16. Васильев А.С., Лашманов О.Ю., Пантюшин А.В. Основы программирования микроконтроллеров. – СПб: Университет ИТМО, 2016. – 95 с.

17. Цилькер Б.Я., Орлов С.А. Организация ЭВМ и систем. Учебник для вузов. – 4-е изд. – СПб.: Питер, 2023. – 688 с.

18. Торопчин Д.С. Синтез перестраиваемых фильтров высокого порядка на переключаемых МОП-конденсаторах в однородном базисе // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2018. – Т. 12. – № 2. – С. 35-40.

Статья поступила в редакцию 28.09.2023

Статья принята к публикации 15.12.2023

УДК 005.6

EDN: AKMJMI

РОБАСТНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОДУКЦИИ С ЦЕЛЬЮ ПЛАНИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА

© Автор (ы), 2023

SPIN: 5279-4175

AuthorID: 469082

ORCID: 0000-0003-2099-4885

ScopusID: 9038734600

ЦАРЕВА Софья Александровна, кандидат химических наук, доцент,
доцент кафедры Экономика и управление

Ярославский государственный технический университет

(150023, г. Ярославль, Московский проспект, 88, e-mail: tsarevasa@ystu.ru)

ORCID: 0009-0000-9339-2688

СТЕПИНА Светлана Евгеньевна, магистрант кафедры Экономика и управление

Ярославский государственный технический университет

(150023, г. Ярославль, Московский проспект, 88, e-mail: svetaestepina@gmail.com)

ORCID: 0000-0002-1448-1031

НАУРБИЕВ Магомед Хаким Хусейнович, магистрант кафедры Экономика и управление

Ярославский государственный технический университет

(150023, г. Ярославль, Московский проспект, 88, e-mail: logan95@list.ru)

Аннотация. В данной статье показаны результаты адаптации метода робастного проектирования по Г. Тагути, для улучшения качества и увеличения срока службы температурного контроллера. Отмечается также, что при робастном проектировании параметров продукции по Г. Тагути одновременно изменяются значения управляемых параметров в нескольких отдельных опытах. Цель настоящего исследования заключается в поиске максимального значения отношения сигнал/шум в рамках анализа результатов экспериментов, проведенных по методу робастного проектирования Г. Тагути. Выявление значения параметров продукции, соответствующих максимальному значению отношения S/N , позволит задать изделию еще на этапе планирования качества такие характеристики, которые обеспечат его нечувствительность к помехам внешним и внутренним, тем самым обеспечат гарантированное качество и пролонгированный срок службы. Робастное проектирование температурного контроллера выбрано здесь в качестве примера для демонстрации и обоснования предлагаемого способа повышения качества продукции. Оно включает в себя определение такого механизма проектирования, которое сможет обеспечить одно целевое значение отклика, например, конкретное значение сопротивления или температуры. Полученные по методу робастного проектирования Г. Тагути ортогональные матрицы позволяют провести эмпирический анализ критериальных параметров температурного контроллера вентилятора обогрева, определяющих его качество и сроки эксплуатации. В статье отмечается, что принятие необоснованных решений на этапе проектирования может привести к проблемам с качеством и стоимостью на более поздних этапах разработки и в условиях производства.

Ключевые слова: робастное проектирование параметров продукции, улучшение качества и срока службы изделий, ортогональная матрица робастного проектирования по Г. Тагути, управляемые и неуправляемые параметры, температурный контроллер, отношение сигнал/шум, дисперсионный анализ.

ROBUST DESIGN OF PRODUCT PARAMETERS FOR QUALITY PLANNING

© The Author (s) 2023

TSAREVA Sofya Alexandrovna, candidate of chemical sciences,
associate professor, department of economics and management

Yaroslavl state technical university

(150023, Russia, Yaroslavl, Moskovsky Prospekt, 88, e-mail: tsarevasa@ystu.ru)

STEPINA Svetlana Evgenievna, graduate student

Yaroslavl state technical university

(150023, Russia, Yaroslavl, Moskovsky Prospekt, 88, e-mail: svetaestepina@gmail.com)

NAURBIEV Magomed Hakim Huseinovich, master of the Department of Economics and Management

Yaroslavl State Technical University

(150023, Yaroslavl, Moskovsky prospect, 88, e-mail: logan95@list.ru)

Abstract. This article shows the results of the adaptation of the robust design method according to G. Taguchi, to improve the quality and increase the service life of the temperature controller. It is also noted that with robust design of product parameters according to G. Taguchi, the values of controlled parameters change simultaneously in several separate experiments. The purpose of this study is to find the maximum value of the signal-to-noise ratio within the analysis of the results of experiments conducted using the method of robust design by G. Taguchi. Identifying the val-

ues of product parameters corresponding to the maximum value of the S/N ratio will allow the product to be set at the quality planning stage such characteristics that will ensure its insensitivity to external and internal interference, thereby ensuring guaranteed quality and prolonged service life. Robust design of the temperature controller is chosen here as an example to demonstrate and justify the proposed method of improving product quality. It includes the definition of a design mechanism that can provide a single target response value, for example, a specific resistance or temperature value. Orthogonal matrices obtained by the method of robust design of G. Taguchi allow an empirical analysis of the criteria parameters of the temperature controller of the heating fan, which determine its quality and service life. The article notes that making unreasonable decisions at the design stage can lead to quality and cost problems at later stages of development and in production conditions.

Keywords: robust design of product parameters, improving the quality and service life of products, orthogonal matrix of robust planning of the Taguchi experiment, controlled and uncontrolled parameters, temperature controller, signal-to-noise ratio, analysis of variance.

Для цитирования: Царева С.А. Робастное проектирование параметров продукции с целью планирования качества / С.А. Царева, С.Е. Степина, М.-Х.Х. Наурубиев // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 12. – № 4(64). – С. 29-36. – EDN: AKMJMI.

Введение. В современных условиях выпуск предприятиями высококачественной продукции является критериальным преимуществом в силу того, что качество выпускаемой продукции – это символ развития бизнеса, который основан на снижении затрат и повышении эффективности работ. Проектирование параметров продукции – важнейший этап для планирования и обеспечения качества.

Растущие требования к качеству выпускаемой продукции – одна из характерных черт не только российского, но и мирового рынка. Поэтому в условиях конкурентной борьбы смогут успешно развиваться только те предприятия, которые создают предпосылки для развития инновационных методов управления качеством, в том числе развитие робастного проектирования параметров при выпуске продукции.

Робастное проектирование подразумевает получение на выходе цикла производства продукции, не чувствительной к факторам помех (неуправляемым

факторам), имеющей устойчивые заданные на этапе проектирования характеристики. Именно, адаптация принципов робастного проектирования позволит выпускать продукцию, качество и, в том числе срок службы, которой можно не только спрогнозировать, но и задать четкий их уровень.

Актуальность работы обусловлена тем, что проектирование и разработка высококачественной продукции имеют критериальное значение для любого производственного предприятия. Эксплуатационные характеристики изделия и затраты на производство напрямую коррелируют с проектированием параметров продукции и установлением допусков.

С точки зрения робастного проектирования по Г. Тагути любое изделие, продукт, услуга или даже процесс могут быть представлены в виде принципиальной модели качества (рис. 1), где функция $F(x, M; z, R) = y$ – выходной уровень качества при заданных параметрах (отклик).

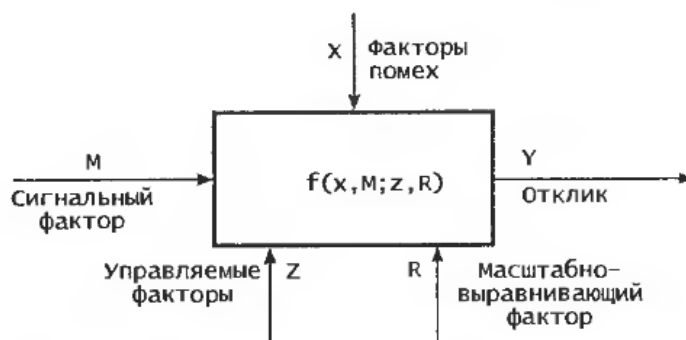


Рисунок 1 – Модель качества изделия [1]

Сигнальные факторы (M) – устанавливаются оператором или инженером для достижения заданного значения выходной характеристики (например, установка 1 скорости на рычаге управления вентилятором).

Управляемые факторы (z) – параметры изделия, предсказуемо устанавливаемые разработчиками.

Масштабно-выравнивающие факторы (R) – вид

управляемых параметров, которые можно легко регулировать для установления прямой зависимости между сигналом и откликом (например, передаточное число в механизмах управления автомобилем).

Факторы помех (x) – неуправляемые параметры и факторы (шум).

Цель робастного проектирования изделия заключается в минимизации влияния x на y за счет

подбора экспериментальным путем таких z и R , при которых отношение сигнал-шум ($\eta = S/N$) спроектированных условий больше, чем всех других условий эксперимента и стабильно в течение всего срока службы изделия, а функция $f(x, M; z, R)$ изделия линейна и не имеет тенденций к изменению [1, 2]. Г. Тагути представил принципы реализации робастного проектирования, в условиях обеспечения надлежащего уровня качества [1].

Исходя из этого, цель данного исследования – по приведенной методике определить такие значения управляемых параметров объекта исследования (температурного контроллера вентилятора обогрева), при которых отношение сигнал-шум больше, чем при любых других значениях предсказуемых параметров и стабильно, что позволит обеспечить надлежащий уровень качества изделия и, соответственно, увеличить срок его службы.

Методология проектирования параметров позволяет выявлять статистические, динамические особенности и проблемы увеличения срока службы. Статистические особенности характеризуются отсутствием сигнальных факторов, то есть мы не знаем, какой отклик эксперимента будет оптимально-целевым. Динамика характеризуется наличием сигналов и, исходя из этого, различных форм линейной и нелинейной зависимостей отклика от сигнала. Эти проблемы легко решаются в процессе самих экспериментов путем использования методов математической статистики в анализе данных, которые приведены в [1].

Проблемы увеличения срока службы связаны с оценкой влияния каждого управляемого фактора на вероятностную кривую срока службы, при этом изучается одновременно большое число управляемых факторов. Для оценки вероятностных кривых срока службы и выбора оптимальных уровней управляемых факторов используется метод анализа, очень близкий к аккумуляционному анализу.

Робастное проектирование включает в себя принципиально три этапа:

1. Системное проектирование работоспособной принципиальной схемы (как есть – факт).
2. Параметрическое проектирование или оптимизация.
3. Проектирование допусков (может входить во второй этап, выполняется отдельно, если параметрическое проектирование не обеспечило необходимую устойчивость изделия к помехам) [3].

Было доказано, что концепции, основанные на робастном проектировании, возможно адаптировать в различных отраслях промышленности, что способствует низким затратам и высоким стандартам качества. Однако параметры модели робастного проектирования основываются на значительном массиве данных измерений, что приводит к неопределенным оценкам параметров и неоптимальным результатам проектирования процесса. В настоящее время предлагаются

различные методы проектирования процессов на основе моделей в условиях неопределенности тех или иных параметров процессов. В частности, в публикации [4] отмечается, что в большинстве случаев при адаптации робастификации игнорируют вариации от партии к партии, которые распространены в различных технологических процессах производства. Кроме того, авторы отмеченной публикации предлагают вероятностно-робастное проектирование процессов. Вариации между партиями считались неточными неопределенностями параметров и соответственно моделировались в виде вероятностей. Метод точечной оценки был объединен с подходом с задержкой для эффективного распространения неопределенности и надежного проектирования процесса.

Ряд авторов отмечают о преимуществе байесовского подхода при робастном проектировании параметров процессов, что обусловлено систематическими решениями о том, когда и как обновлять параметры модели процесса для оптимизации проектирования процессов с учетом качества данных. Результаты сравнения показывают, что предлагаемый подход может обеспечить лучшую производительность процесса, чем традиционные подходы к проектированию, которые не учитывают неопределенность качества данных и параметров модели [5].

В [6] предлагается новая робастная инфраструктура оптимизации для решения общих нелинейных задач при проектировании процессов производства. Принята локальная линеаризация относительно неопределенных параметров вокруг множественных реализаций неопределенности, и реализован итерационный алгоритм для решения задачи. Кроме того, предлагаемая методология может обрабатывать различные категории проблем в зависимости от их сложности.

По мнению авторов [7], робастное проектирование параметров процессов включает в себя четыре основных вида деятельности: (1) проектирование и модификация концептуального проектного решения, (2) измерение и моделирование надежности конструкции, (3) обработка и оценка данных о надежности и (4) масштабирование проекта для оптимизации параметров и значений допусков. Для каждого из видов деятельности представлен набор соответствующих методов робастного проектирования. В работе также отмечается, что основная цель робастификации состоит в том, чтобы предоставить команде разработчиков лучший обзор и понимание набора инструментов робастного проектирования и поддерживать непрерывное применение робастификации на протяжении всей разработки продукта, предоставляя последовательное описание того, когда применять методы и как они влияют на надежность конструкции.

Методология. Исследования по робастному

два разных сигнала: «включить» (M) и «выключить» (M_1). Причем для экспериментов по включению M_1 будет помехой и наоборот.

Отбор факторов. Сигнальным фактором M является R_3 . Управляемые факторы (z) – R_1, R_2, R_4, E_0, E_z . Необходимо отметить, что целесообразно рассматривать не сами величины сопротивлений, а их отношения $R_2/R_1, R_4/R_1$. Следовательно, $z = (R_1, R_2/R_1, R_4/R_1, E_0, E_z)$. Для параметров напряжения E_z и E_0 есть физическое условие – первое должно быть

меньше второго.

В таблице 1 приведен набор управляемых параметров и их значения, полученные опытным путем. В таблице 2 показан набор помех, образованных из допусков управляемых параметров. Факторы иных допусков, в т.ч. нивелирование свойств, в данном эксперименте не учитывается ввиду достаточности допусков управляемых параметров. Три уровня помех соответствуют значениям $-\sqrt{3}/2\cdot\sigma; 0; \sqrt{3}/2\cdot\sigma$.

Таблица 1 – Управляемые параметры и значения их уровней при робастном проектировании

Обозначение параметра	Параметр	Уровни начальных условий эксперимента		
		1	2	3
A	Сопротивление R_1 (кОм)	1,660	3,000	5,000
B	$b = R_2/R_1$	0,330	1,000	2,000
C	$c = R_4/R_1$	4,320	7,000	15,000
D	E_0	7,000	9,000	11,000
F	E_z	3,700	5,000	6,100
M	R_3 (кОм)	0,768	1,000	1,201

Таблица 2 – Неуправляемые параметры и значения их уровней при робастном проектировании

Обозначение параметра	Параметр	Допуск, % от номинального значения	Уровни, % номинального значения (три стандартных отклонения)		
			1	2	3
A	Сопротивление R_1 (кОм)	5	-2,04	0	2,04
B	$b = R_2/R_1$	5	-2,04	0	2,04
C	$c = R_4/R_1$	5	-2,04	0	2,04
D	E_0	5	-2,04	0	2,04
F	E_z	5	-2,04	0	2,04

Результаты. Оценка отношения S/N . Назначим для сигнала M три уровня значений соответственно: 0,768; 1 и 1,201 кОм. Три уровня сигнала нужны, чтобы оценить не только линейные эффекты, но и квадратичные (помехи). Опираясь на эмпирические зависимости [8] и [9] приведены формулы для расчетов. Для анализа одного сигнального и пяти управляемых факторов воспользуемся ортогональной матрицей L18 [10, 11, 16]. Матрица L18 и соответствие столбцов помехам и сигнальным факторам приведены в таблице 3. Также приведены значения $y = R_{ТЗМ}$, соответствующие 18 условиям сочетания сигнала и управляемых параметров. Эти значения получаются путем фиксации значений с резистивного термометра после проведения экспериментов в соответствии с ортогональной матрицей.

Помехи в эксперименте играют опосредованную роль триггера. Было проведено 18 испытаний, результаты каждого из которых были измерены 5 раз под влиянием (с учетом) факторов помех. В таблице 3 приведены средние значения y из этих пяти измерений.

Оценка целевого значения (показателя отношения сигнал/шум) проводилась по формуле (2) для каждого из 18 испытаний:

$$\eta_i = \frac{10Lg}{\sigma^2} \quad (2),$$

где η_i – показатель отношения сигнал/шум (целевое значение – чем больше, тем оптимальнее условия эксперимента), σ – дисперсия значений пяти измерений в рамках одного испытания, i – испытание.

Цель эксперимента – выявить наибольшее значение η для идентификации надлежащего уровня каждого управляемого параметра (одного из трех). Для этого проводился анализ средних η для каждого уровня всех пяти управляемых параметров. Данный анализ приведен в таблице 4.

Среднее значение η уровня 1 величины R_1 (параметра A) было получено усреднением шести значений η , которым по ортогональной матрице соответствует 1 уровень значений параметра A . Аналогично по другим уровням и параметрам. Цветом выделены целевые уровни значений параметров, соответствующие наибольшим значениям η , при которых контроллер будет минимально изменчив в показаниях и будет работать в течение заявленного срока службы и более даже с учетом помех, допусков и разных сигнальных факторов. Наибольшее η отмечается при: $R_1 = A_2; R_2/R_1 = B_p; R_4/R_1 = C_3; E_0 = D_p; E_z = F_3$.

Был выполнен стандартный дисперсионный анализ значений η (табл. 5) в соответствии с положениями [12]. Столбец сумм квадратов показывает

относительный вклад каждого фактора в общую дисперсию 18 значений η . Величина F показывает влияние каждого фактора по отношению к ошибке.

Из таблицы 5 видно, что R_1 (параметр A) незначительно влияет на η . Отношение сигнал/шум

для выбранных оптимальных уровней управляемых параметров составляет 17,57. Это больше изначальных значений для параметров, уровни которых соответствуют 13 эксперименту, когда $S/N = 3,66$.

Таблица 3 – Ортогональная матрица планирования эксперимента L18

Испытание	Сигнал М	Управляемые параметры						η	Y ср ($R_{\text{ТЗМ}}$)
		A	B	-	C	D	F		
1	1	1	1	1	1	1	1	12,47	1,852
2	1	2	2	2	2	2	2	12,89	1,881
3	1	3	3	3	3	3	3	13,21	1,811
4	2	1	1	2	2	3	3	14,23	2,016
5	2	2	2	3	3	1	1	14,58	2,143
6	2	3	3	1	1	2	2	7,10	2,133
7	3	1	2	1	3	2	3	15,37	2,370
8	3	2	3	2	1	3	1	4,69	2,300
9	3	3	1	3	2	1	2	15,24	2,270
10	1	1	3	3	2	2	1	7,69	1,913
11	1	2	1	1	3	3	2	14,88	1,852
12	1	3	2	2	1	1	3	14,17	1,881
13	2	1	2	3	1	3	2	7,89	2,020
14	2	2	3	1	2	1	3	14,48	2,212
15	2	3	1	2	3	2	1	15,59	2,077
16	3	1	3	2	3	1	2	14,98	2,347
17	3	2	1	3	1	2	3	13,78	2,214
18	3	3	2	1	2	3	1	8,78	2,308
	M	A	B	C	D	F		η ср Y	
	Сигнальный параметр	Факторы помех							

Таблица 4 – Анализ целевых значений параметров продукции при робастном проектировании

Обозначение параметра	Параметр	Значение η для уровней управляемых параметров		
		1	2	3
A	Сопrotивление R_1 (кОм)	12,105	12,550	12,348
B	$b = R_2/R_1$	14,365	12,280	10,358
C	$c = R_4/R$	10,018	12,218	14,768
D	E_0	14,320	12,018	10,447
F	E_z	10,633	12,163	14,207

Таблица 5 – Дисперсионный анализ для η

Обознач.	Фактор	Значение η для уровней управляемых параметров			Среднее	Общая простая дисперсия	Число степеней свободы	Сумма квадратов	Средний квадрат	F
		1	2	3						
A	Сопrotивление R_1 (кОм)	12,105	12,550	12,348	12,33433	0,04965	2	8,45	4,225	0,5
B	$b = R_2/R_1$	14,365	12,280	10,358	12,33433	4,016226	2	102,91	51,455	6,5
C	$c = R_4/R$	10,018	12,218	14,768	12,33467	5,650833	2	126,71	63,355	7,9
D	E_0	14,320	12,018	10,447	12,26167	3,79456	2	94,74	47,37	5,8
F	E_z	10,633	12,163	14,207	12,33433	3,21539	2	97,17	48,585	6,4
Межгрупповая							4	0,012702	0,003176	3,47
Внутригрупповая							10	33,45331	3,345331	-

Обсуждение. Таким образом, необходимо принимать и внедрять в реализацию изделия следующие параметры: $R_1 = A_2 = 3,0$ кОм; $R_2/R_1 = B_1 = 0,33$; $R_4/R_1 = C_3 = 15$; $E_0 = D_1 = 7$ В; $E_z = F_3 = 6,1$ В. Дальнейшее улучшение η можно достичь анализом для еще более меньших значений B и больших значений C , так как напряжение имеет естественное

ограничение $E_z < E_0$, а D и F изменять далее не представляется возможным. Подобный механизм проектирования можно применять для поиска условий, которые смогут обеспечить одно целевое значение отклика y , например, конкретное значение сопротивления или температуры.

Необходимо отметить о возможности внедрения

технологии анализа процессов в контексте робастного проектирования параметров продукции, что позволит осуществлять поточный мониторинг процессов для повышения качества продукции [13-17].

Выводы. Резюмируя представленные материалы необходимо отметить, что робастное проектирование является точным и эффективным методом планирования и проектирования качества продукции с минимальными затратами, в том числе на корректировку дефектов и гарантийное обслуживание продукции, за счет минимизации изменчивости объектов проектирования в среде эксплуатации (включая внешние помехи, производственные несовершенства и деградацию деталей). Следует отметить, что робастное проектирование продукции приводит к более низким производственным и эксплуатационным затратам, увеличивает срок службы и надежность изделия [18-21]. Тем самым обеспечивается надлежащий срок службы любого изделия, параметры которого были подвержены робастному проектированию.

В статье показано, как выявить такие значения управляемых параметров изделия (в реальности – характеристики продукции или условия ее производства) на примере температурного контроллера, которые обеспечат нечувствительность этого изделия к факторам помех. Такие значения выявлялись экспериментальным путем на основании плана экспериментов по ортогональной матрице с целью идентификации максимального значения отношения сигнал/шум (S/N). Чем больше отношение сигнал/шум по результатам того или иного эксперимента с комбинацией уровней значений управляемых параметров, тем меньше дисперсия значений $R_{\text{изд}}$, следовательно, тем меньше влияние внешних и внутренних факторов помех.

Представленный метод робастного проектирования параметров продукции в условиях обеспечения качества продукции пролонгированного срока службы дает ряд преимуществ относительно иных методов:

1) использование ортогональных матриц достаточно просто в адаптации, что обусловлено отсутствием вычисления производных и гессианов, легкое обращение с большим массивом переменных и с их комбинациями;

2) отношение сигнал/шум, определяющий условия эксперимента параметр является наиболее эффективной переменной в выражении целевого значения качества изделия, так как учитываются значения всех факторов, окружающих, управляющих и управляемых изделием;

3) приведенные результаты по дисперсионному анализу в таблице 5 позволяют обозначить вклад каждого фактора в дисперсию ошибки и проработать только те параметры, которые обеспечивают максимальную робастность изделия и процесса его производства.

Таким образом, была продемонстрирована воз-

можность применения метода робастного проектирования для получения должного уровня качества изделия на примере планирования качества температурного контроллера для увеличения его срока службы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Управление качеством. Робастное проектирование. Метод Тагути. Перевод с англ. – М.: «СЕЙФИ» 200. – 384 с.
2. Налимов В.В., Голикова Т.И. Логические основания планирования эксперимента. – М.: Metallurgia, 1981. – 152 с.
3. Горский В.Г., Адлер Ю.П. Планирование промышленных экспериментов. Модели статистики. – М.: Metallurgia, 1974. – 112 с.
4. Xie, X.; Schenkendorf, R. Robust Process Design in Pharmaceutical Manufacturing under Batch-to-Batch Variation. Processes 2019, 7, 509. – DOI: <https://doi.org/10.3390/pr7080509>.
5. Linhan Ouyang, Jianxiong Chen, Yizhong Ma, Chanseok Park & Jionghua (Judy) Jin (2020) Bayesian closed-loop robust process design considering model uncertainty and data quality, ISE Transactions, 52:3, 288-300. – DOI 10.1080/24725854.2019.1636428.
6. Clees, T.; Nikitin, I.; Nikitina, L. and Thole, C. (2011). Nonlinear metamodeling and robust optimization in automotive design. In Proceedings of 1st International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications (SIMULTECH 2011) - SDDOM; ISBN 978-989-8425-78-2; ISSN 2184-2841, SciTePress, pages 483-491. - DOI: 10.5220/0003646704830491
7. Simon Moritz Göhler, Martin Ebro & Thomas J. Howard (2018) Mechanisms and coherences of robust design methodology: a robust design process proposal, Total Quality Management & Business Excellence, 29:3-4, 239-259. – DOI: 10.1080/14783363.2016.1180952.
8. Федоров В.В. Теория оптимального эксперимента. – М.: Наука, 1971. – 311 с.
9. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных решений. – М.: Наука, 1976. – 139 с.
10. Адлер Ю.П., Шинкаренко Л.М., Тимичева С.С., Мяцова Т.М., Коростелева Н.Г. Опыт использования методологии Тагути при оптимизации технологического процесса изготовления резисторов // Надежность и контроль качества. Сер. Статистические методы. – 1992. – № 12, – 60 с.
11. Лунева Е.Е., Дмитриева Е.А., Цапко Г.П. Использование метода робастного проектирования Тагути для оптимизации бизнес-процессов // Статистика и экономика. – 2011. – № 3 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-metoda-robastnogo-proektirovaniya-taguti-dlya-optimizatsii-biznes-protsessov>.
12. Коновалов В.В. Практикум по обработке результатов научных исследований с помощью ПЭВМ.: Учебное пособие. – Пенза: ПГСХА, 2003. - 176 с.
13. Чернова Ю.К., Щипанов В.В. Первые шаги робастного проектирования в отечественном автомобилестроении // Известия ТПУ. – 2006. – № 5. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/pervye-shagi-robastnogo-proektirovaniya-v-otechestvennom-avtomobilestroenii>.
14. Тагути Г.М. Оптимальное проектирование как техника качества // Методы менеджмента качества. – 2003. – № 9. – С. 27-35.
15. Terrien B., Zalewski J. Design of experiments via Taguchi methods: orthogonal arrays. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://controls.engin.umich.edu/wiki/index.php/Design_of_experiments_via_taguchi_methods:_orthogonal_arrays.
16. Адлер Ю.П., Маркелова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. - 279 с.
17. Лунева Е.Е. Цапко Г.П. Иерархия бизнес-процессов

приборостроительного предприятия позаказного типа и их приоритет при внедрении процессного подхода // Молодежь и современные информационные технологии: - Матер. VIII Всеросс. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых: – г. Томск, 3-5 марта 2010. - Томск, 2010. - Т. 2. - С. 198-200.

18. Raghavarao D. Constructions and combinatorial Problems in design of experiments. New York: Wiley, 1971. – 386 с.

19. Разумов-Раздолов К.Л., Волокитина И.В. Применение робастной оптимизации при проектировании //Известия ТулГУ. Технические науки. 2008. № 1. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/primeneniye-robastnoy-optimizatsii-pri-proektirovanii>.

20. Брагин, Ю.В. Инженерные методы повышения качества и снижения затрат по Генити Тагути. Функция потерь. Вып. 1 / Ю.В. Брагин. – М.: «Ярославль: Центр качества», 2005. – 68 с.

21. Лисенков, А.Н. Робастное проектирование: использование ортогональных планов неполного перебора вариантов / А.Н. Лисенков. – М.: «Методы менеджмента качества». – 2007. – № 5. – С. 18-22.

Статья поступила в редакцию 21.08.2023

Статья принята к публикации 15.12.2023

УДК 004.8:658.5
EDN: JNTCNC

ПРАКТИКА ВНЕДРЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ СИСТЕМЫ ПРЕДПРИЯТИЙ

© Авторы 2023
SPIN: 7345-7540
AuthorID: 585433
ORCID: 0000-0002-2377-539X
ScopusID: 57188806820

ПАЩЕНКО Татьяна Юрьевна, кандидат экономических наук, доцент,
доцент кафедры «Менеджмент и экономическая безопасность»

Пензенский государственный университет
(440026, Россия, Пенза, улица Красная, 40, e-mail: tania.pashchenko@gmail.com)

ПАРАЕВА Анна Сергеевна, студентка кафедры «Менеджмент и экономическая безопасность»

Пензенский государственный университет
(440026, Россия, Пенза, улица Красная, 40, e-mail: paraevaanna64@gmail.com)

ПЕЛЮКПАШИДИ Ксения Георгиевна, студентка кафедры «Менеджмент и экономическая безопасность»

Пензенский государственный университет
(440026, Россия, Пенза, улица Красная, 40, e-mail: peksenia41@gmail.com)

Аннотация. В настоящее время, как отмечают многие исследователи, все актуальнее становится проблема внедрения искусственного интеллекта (далее ИИ) и, в частности, проблема внедрения ИИ в производственные системы предприятий. Данная проблема тесно связана с научными и практическими задачами по анализу и оценке рискованности и целесообразности такого внедрения. Основной целью статьи является анализ практики внедрения искусственного интеллекта в производственные системы предприятий. Данный анализ имеет большое практическое значение, так как позволяет выявить реальные и потенциальные риски, оценить дополнительные возможности развития предприятия. В статье рассмотрены основные аспекты внедрения искусственного интеллекта на иностранных и отечественных предприятиях, приведены конкретные примеры, а также выделены перспективы развития в этой сфере в ближайшем будущем. Проведенный анализ выявил следующее: внедрение систем искусственного интеллекта на предприятии – это дорогостоящий и длительный процесс; в большинстве случаев компании используют типовые ИИ продукты.

Ключевые слова: искусственный интеллект, нейросети, инновация, производство, промышленность, автоматизация, оптимизация.

THE PRACTICE OF IMPLEMENTATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE INTO ENTERPRISE PRODUCTION SYSTEMS

© The Authors 2023

PASHCHENKO Tatiana Yuryevna, candidate of sciences in Economics, associate professor,
associate professor of the department «Management and economic security»

Penza State University
(440026, Russia, Penza, Krasnaya Street, 40, e-mail: tania.pashchenko@gmail.com)

PARAEVA Anna Sergeevna, student of the department «Management and economic security»

Penza State University
(440026, Russia, Penza, Krasnaya Street, 40, e-mail: paraevaanna64@gmail.com)

PELYUKPASHIDI Ksenia Georgievna, student of the department «Management and economic security»

Penza State University
(440026, Russia, Penza, Krasnaya Street, 40, e-mail: peksenia41@gmail.com)

Abstract. Currently, as many researchers note, the problem of the implementation of artificial intelligence (hereinafter AI) and, in particular, the problem of the implementation of AI into the production systems of enterprises is becoming more urgent. This problem is closely related to the scientific and practical tasks of analyzing and evaluating the riskiness and expediency of such an implementation. The main purpose of the article is to analyze the practice of implementing artificial intelligence into the production systems of enterprises. This analysis is of great practical importance, as it allows to identify real and potential risks, assess additional opportunities for the development of the enterprise. The article discusses the main aspects of the implementation of artificial intelligence in foreign and domestic enterprises, provides specific examples, and highlights the prospects for development in this area in the near future. The analysis revealed the following: the implementation of artificial intelligence systems in an enterprise is an expensive and time-consuming process; in most cases, companies use standardized AI products.

Keywords: artificial intelligence, neural networks, innovation, production, industry, automation, optimization.

Для цитирования: Пащенко Т.Ю. Практика внедрения искусственного интеллекта в производственные системы предприятий / Т.Ю. Пащенко, А.С. Параева, К.Г. Пелюкпашиди // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 12. – № 4(64). – С. 37-42. – EDN: JNTCNC.

Введение. В настоящее время мир уже немислим без разнообразных технологий и инноваций, служащих неким ассистентом во всех сферах деятельности человека. На сегодняшний день любой желающий имеет возможность обратиться «за помощью» к системам искусственного интеллекта (ИИ). Автоматизация и оптимизация протекающих процессов не обошли стороной и сектор промышленности. Внедрение ИИ в производственные системы предприятий – одно из самых перспективных направлений. Ссылаясь на многочисленные экспертные мнения и прогнозы, можно с уверенностью сказать, что в ближайшее десятилетие системы автоматизации производства значительно упростят работу сотням миллионов сотрудников предприятий во всем мире, что неминуемо приведет к резкому сокращению рабочих мест. Однако, стоит заметить, что взамен «устаревшим» рабочим местам, возникнут новые, требующие специалистов по поддержке и развитию технологий искусственного интеллекта на производстве.

Методология. Проблеме внедрения искусственного интеллекта посвятили свои работы многие отечественные и зарубежные ученые: Баринаева Н.В., Баринев В.Р. [1], Гладилин Л.Ю. [2], Дашков А.А., Нестерова Ю.О. [3], Дейвенпорт Т. [4], Ивановский Б.Г. [5], Куижева С.К., Задорожная Л.И., Овсянникова Т.А., Зарубин В.И. [6], Ларин С.Н., Соколов Н.А., Герасимова Л.И. [7], Лукьянов И.В. [8], Матюшок В.М., Красавина В.А., Матюшок С.В. [9], Мурзагалина Г.М., Китабанов А. [10], Сапунов А.В., Сапунова Т.А. [13], Саханевич Д.Ю. [14], Соколова И.С., Гальдин А.А. [15], Степнов И.М., Ковальчук Ю.А. [16], Туровец Ю.В., Вишневицкий К.О. [17, 18], Федотова А.В. [19], Фомичева Т.Л., Романов Р.М. [20], Шурина С.В., Данилов А.С. [21] и др. В то же время отдельные вопросы внедрения ИИ пока еще недостаточно изучены, поэтому рассматриваемая тема является актуальной и имеет большую практическую значимость.

Цель работы – анализ практики внедрения искусственного интеллекта в производственные системы предприятий.

Для достижения поставленной цели и решения сформулированных в соответствии с ней задач использовались следующие методы: метод информационного поиска в сети Интернет; метод поиска информации по профессиональным базам данных и аналитическим обзорам; метод классификации; метод сравнительного анализа данных; кейсовый метод и др.

С помощью перечисленных выше методов было выявлено, что системы ИИ могут быть применимы в процессах роботизации, проектирования

и моделирования, развивая при этом как масштабные, так и мелкосерийные производства. Говоря о роботизации, необходимо упомянуть о непосредственных роботах-ассистентах, способных решать базовые задачи, такие как: планирование управления запасами на складе, и цепочками поставок; прогнозирование количества запчастей, необходимых для проведения обслуживания ремонтных работ. Кроме того, ИИ способны к созданию симуляционных моделей, необходимых в процессе проектирования, а также к визуализации их испытания без использования конкретных физических прототипов, что способствует снижению затрат на разработку продуктов.

Инновации ИИ довольно эффективно проявляют себя в сфере обеспечения безопасности на промышленных объектах, контролируя не только технологические производственные процессы, но и соблюдение работниками техники безопасности, а также наличие средств, необходимых для индивидуальной защиты. Кроме того, данные технологии способны прогнозировать вероятные риски, предотвращая возникновение несчастных случаев. Существуют алгоритмы, которые наделены навыком расчета сроков работы оборудования, анализируя которые ИИ может спрогнозировать его выход из строя, давая работникам понять даты устранения проблемы, проведения ремонта или полной замены технологических приборов. Помимо этого, ИИ может определить производственный и технологический брак, недостаточный уровень качества исходного сырья, а также распознать нарушение этапности и полноты производственных процессов.

ИИ может взять на себя функцию контроля над процессами погрузочных и разгрузочных работ; мониторинга квалификации сотрудников и целесообразности нахождения их в тех или иных рабочих зонах, а также планирования рабочих смен; аналитики сведений предприятия об объемах производства, закупках, поставках и об оставшейся готовой продукции или незавершенном производстве на складе, что впоследствии облегчает работу персонала в сфере учетных и контрольных мероприятий.

Постиндустриальный этап общественного развития привел к тому, что большая доля производственных процессов является частично или полностью автоматизированной, сводя при этом ручной труд к минимуму. Впрочем, эволюция в производстве на этом не останавливается, наступает следующий этап его развития, а именно активное внедрение ИИ-технологий, повышающих продуктивность производства.

Результаты. Согласно результатам проведен-

ного анализа по уровню трансформирования промышленности при помощи ИТ-технологий, как правило, лидерами являются зарубежные страны Азии (Южная Корея, Китай и Япония), Европы (прежде всего Германия и Великобритания), а также

США и Канада. В России данные инновации тоже являются приоритетными и развиваются довольно стремительно, но получают значительно меньшее финансирование со стороны частных компаний, чем в странах, представленных на рисунке 1.

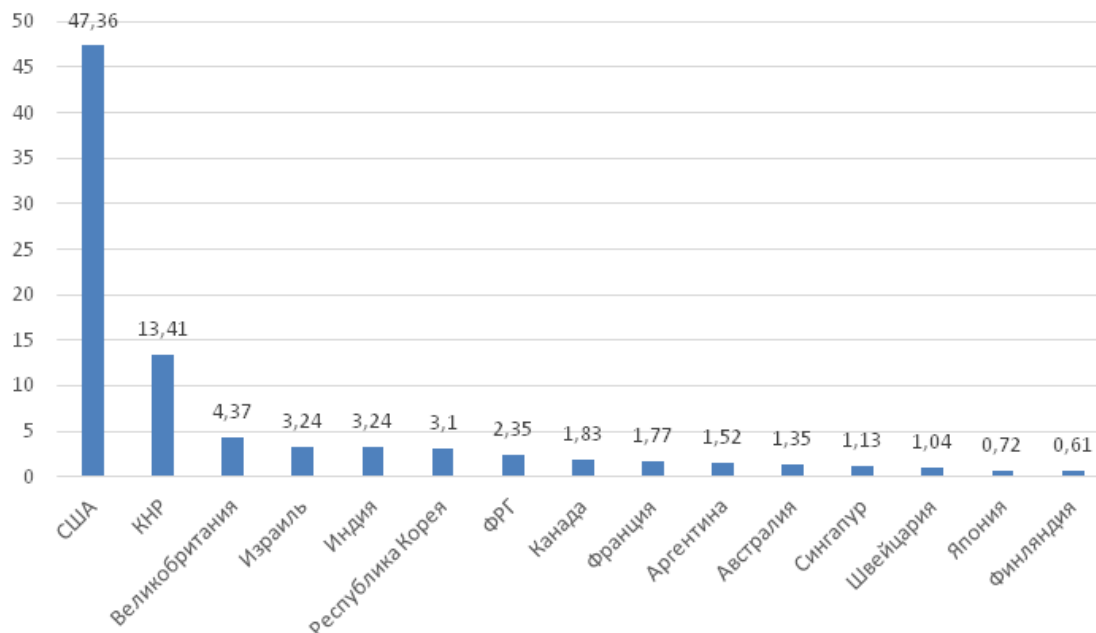


Рисунок 1 – Частные инвестиции в ИИ по странам в 2022 году [12]

Примером успешного внедрения ИИ в производственную систему является немецкая компания BMW, применившая данные технологии на своих заводах. Так, они активно применяют инновации компьютерного зрения (далее КЗ), проверяя качество автомобилей, а также выявляя возможный производственный брак в реальном времени (подобные технологии применяются и в американской корпорации General Motors и немецком концерне Volkswagen Group), также программа способна распознать дым и огонь, благодаря чему можно предотвратить вероятный пожар. Помимо этого, КЗ способно контролировать прогулы и нарушения среди персонала, фиксируя время явки (или ухода) сотрудников на рабочее место. Данные технологии позволили обеспечить исполнение сотрудниками мер социального дистанцирования, установленного требованиями соблюдения норм во время пандемии COVID-19. На этом способности КЗ не ограничиваются – их также используют в компании для контроля психического и эмоционального состояния рабочих, на основе которых руководители могут отправить их домой или предоставить необходимое медицинское обследование. [11]

На основе применения машинного обучения (МО) компания Nokia произвела внедрение видео-приложения, чтобы предупреждать операторов, отвечающих за те или иные сборочные линии, о случаях выявления ошибок в технологических процессах. Международная промышленная группа Thales

SA использует систему МО для прогнозирования планово-предупредительных средств обслуживания европейских высокоскоростных железных дорог (ЖД). На основе применения множества датчиков, фирма накапливает сведения о состоянии элементов подвижных составов ЖД, на основании которых ИИ составляет прогноз о вероятных проблемах на железнодорожных линиях (подобные технологии также применяются и в нидерландской компании Strukton Rail, использующей предиктивное обслуживание). Объединением систем КЗ и МО выделяется японская транснациональная машиностроительная компания Canon, изобретшая систему Assisted Defect Recognition, которая возвысила уровень контроля качества в центрах производства на высочайшую ступень.

Говоря о приемах ИИ, необходимо упомянуть и про предиктивную аналитику интернета вещей, составляемую на основе облачных сервисов (в частности, *Microsoft Azure*). Подобные системы применяет компания Schneider Electric, чтобы повысить трудовую безопасность, сократить расходы и обеспечить бесперебойный устойчивый рост предприятия.

В качестве примера вышеупомянутой функции ИИ в сфере проектирования моделей новейших продуктов можно привести японскую компанию Nissan, которая, в тестовом режиме, использует программу *DriveSpark*, создающую визуальные модели будущих поколений автомобилей собст-

венной марки.

Помимо производства технических средств, ИИ также используется и при производстве продовольственных продуктов – в компании Danone, которая при помощи МО способна с определенной точностью спрогнозировать спрос на собственные товары. ИИ используют для улучшения упаковки, чтобы привлечь с помощью маркетинга новую клиентскую потребительскую аудиторию, повышая продажи и увеличивая прибыль.

Разработки в области ИТ-инноваций на производстве активно проводятся и на отечественных площадках. [11] Так, одним из передовых продуктов является «цифровой прораб», созданный системным интегратором Oberon, контролирующей технику безопасности на производстве с помощью использования ИИ и КЗ. Система «Прораб», наделенная нейросетью и оснащенная автоматическими видеокамерами, отслеживает численность персонала и соответствующей техники и индивидуальных защитных средств, а также учитывает рабочее время и рабочие процессы.

Пандемия COVID-19 стала «толчком» внедрения ИИ на российских предприятиях.

Так, в процессе своей деятельности, активному внедрению ИИ подверглись такие компании как: Газпромнефть, Северсталь, Сегежский целлюлозно-бумажный комбинат, агрономическое предприятие «Победа», Новоліпецкий металлургический комбинат, Мосэнергосбыт и многие другие. К примеру, нефтяная компания «Газпромнефть» в 2021 году внедрила систему автоматического распознавания геологической породы, данные о которой используются в процессе проектирования модели месторождения. К слову, на исследование полуметра породы трое рабочих тратят около недели, а ИИ

сокращает данный процесс до одного дня. В целом, разработка технологий ИИ является приоритетным направлением на многих предприятиях, в частности и в «Северстали», развитием собственных систем КЗ на внутренних небольших объемах данных.

Внедрение ИИ в свои системы претерпевает и сектор сельского хозяйства. Так агропредприятие «Победа» в 2020 году начало применять автономное управление сельскохозяйственной техникой, когда компьютерный ассистент координирует работу комбайна, в то время как рабочий-специалист досконально проверяет качество обработки угодий урожая. Автоматизация производственных процессов была произведена и на предприятиях химической промышленности. Так, «Уралхим», внедрив ИИ в управленческую структуру предприятия, увеличил объемы выпуска продукции почти на 6%, а предприятие по выпуску удобрений «Акрон» добилось подобным образом снижение фактических затрат на электроэнергию. [11]

Обсуждение. На рисунке 2 представлены данные мониторинга использования ИИ в России [18] Отмечается, что большинство организаций пока используют ИИ только в тестовом режиме.

На рисунке 3 представлено распределение продуктов на основе ИИ по способам их приобретения организациями-пользователями. В большинстве случаев российские компании используют типовые («коробочные») ИИ продукты в силу их более низкой стоимости и готового функционала. Но в перспективе такая модель может создать риски для безопасности предприятия и существенно увеличить затраты на поддержание и изменение системы, что создает стимулы для построения собственных ИИ команд в крупных компаниях.

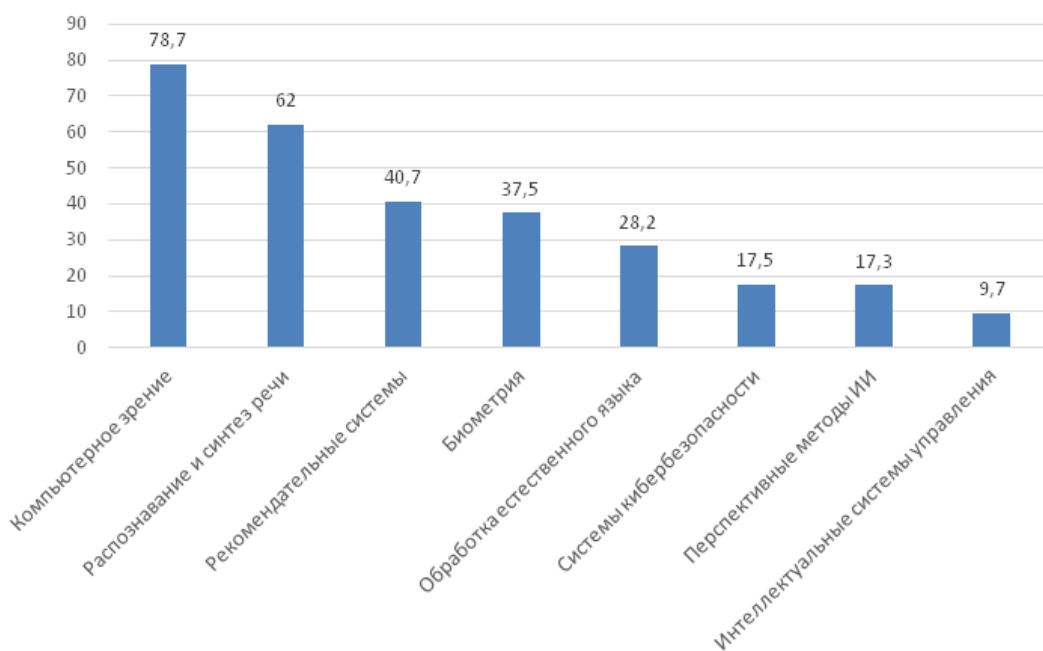


Рисунок 2 – Использование ИИ (в процентах от числа организаций-пользователей ИИ в России) [18]

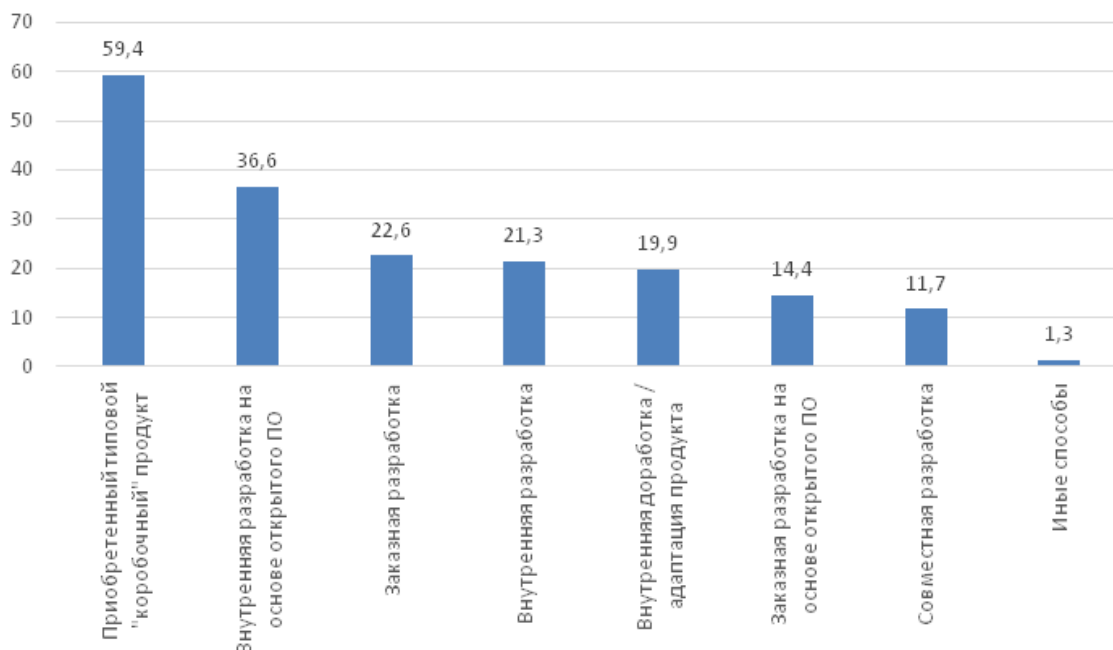


Рисунок 3 – Способы приобретения продуктов на основе технологий ИИ (в процентах от числа организаций-пользователей ИИ) [18]

Выводы. В заключение необходимо отметить, что любое внедрение систем ИИ на предприятии – это дорогостоящий и достаточно длительный процесс, чреватый множеством рисков, решиться на который могут не все. Среди рисков – риск для многих специалистов потерять рабочее место. Именно поэтому уже сегодня предприятиям необходимо искать высококвалифицированные рабочие кадры, а будущим работникам – задуматься о получении дополнительных навыков, непосредственно связанных с изменениями в индустрии и с IT-сферой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Барина Н.В., Барин В.Р. Цифровая экономика, искусственный интеллект, Индустрия 5.0: вызовы современности // Вестник Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова. – 2022. – Т. 19. – № 5 (125). – С. 23-34.
2. Гладилин Л.Ю. Практические аспекты применения искусственного интеллекта в бизнесе // Путеводитель предпринимателя. – 2023. – Т. 16. – № 4. – С. 128-133.
3. Дашков А.А., Нестерова Ю.О. Исследование влияния искусственного интеллекта на бизнес-модель организации // E-Management. – 2020. – Т. 3. – № 4. – С. 26-36.
4. Дейвенпорт Т. Внедрение искусственного интеллекта в бизнес-практику: преимущества и сложности. Библиотека Сбербанка. Искусственный интеллект. – М.: Альпина Паблшер. – 2020. – 320 с.
5. Ивановский Б.Г. Экономические эффекты от внедрения технологий «искусственного интеллекта» // Социальные новации и социальные науки. – Москва: ИНИОН РАН. – 2021. – № 2. – С. 8-25.
6. Куижва С.К., Задорожная Л.И., Овсянникова Т.А., Зарубин В.И. Задачи использования искусственного интеллекта в бережливом производстве // Новые технологии. – 2021. – Т. 17. – № 6. – С. 106-115.
7. Ларин С.Н., Соколов Н.А., Герасимова Л.И. Особенности развития технологий искусственного интеллекта // Экономические исследования и разработки. 2019. – № 6. – С. 81-92.
8. Лукьянов И.В. Инновационная экономика и искусственный интеллект как движущие факторы четвертой

промышленной революции // Экономика: вчера, сегодня, завтра. – 2019. – Т. 9. – № 7-1. – С. 215-224.

9. Матюшок В.М., Красавина В.А., Матюшок С.В. Мировой рынок систем и технологий искусственного интеллекта // Вестник РУДН. Серия: Экономика. – 2020. – Т. 28. – № 3. – С. 505-521.

10. Мурзагалина Г.М., Китабанов А. Опыт применения искусственного интеллекта в производстве для повышения производительности и безопасности персонала // Московский экономический журнал. – 2022. – № 12. – С. 474-482.

11. Открытая библиотека кейсов в области бизнес-эффективности проектов, созданных с использованием искусственного интеллекта. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ai-russia.ru/>

12. Отчет об индексе искусственного интеллекта за 2023 год (Artificial Intelligence Index Report 2023). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://aiindex.stanford.edu/wp-content/uploads/2023/04/HAI_AI-Index-Report_2023.pdf

13. Сапунов А.В., Сапунова Т.А. Актуальность внедрения искусственного интеллекта в управлении производством на предприятии // Journal of Economy and Business. – 2022. – № 5-3 (87). – С. 47-50.

14. Саханевич Д.Ю. Исследование подходов и методов применения искусственного интеллекта и машинного обучения в социально-экономических процессах // Вестник Омского университета. Серия «Экономика», 2020. – Т. 18. – № 2. – С. 65-79.

15. Соколова И.С., Гальдин А.А. Практическое применение искусственного интеллекта в условиях цифровой экономики // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2018. – № 2 (26). – С. 71-79.

16. Степнов И.М., Ковальчук Ю.А. Экономические ловушки внедрения искусственного интеллекта // Экономика. Налоги. Право. – 2020. – № 13 (2). – С. 92-102.

17. Туровец Ю.В., Вишневецкий К.О. Искусственный интеллект в России: векторы инноваций // Серии экспресс-информаций о развитии науки, технологий, инноваций и цифровой экономики Института статистических исследований и экономики знаний НИУ ВШЭ. 2023. – № 318 (82). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://issek.hse.ru/news/862014108.html>

18. Туровец Ю.В., Вишневецкий К.О. Искусственный интеллект в России: кто, что и как внедряет // Серии экспресс-информаций о развитии науки, технологий, инноваций и цифровой экономики Института статистических исследований и экономики знаний НИУ ВШЭ. 2023. – № 317

(81). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://issek.hse.ru/news/862013645.html>

19. Федотова А.В. Искусственный интеллект как фокус развития цифровой экономики: теоретические и практические аспекты // Московский экономический журнал. – 2021. – № 6. – С. 476-487.

20. Фомичева Т.Л., Романов Р.М. Роль искусственного интеллекта в цифровизации экономики и проблемы развития в РФ // Экономика: вчера, сегодня, завтра. – 2020. – Т. 10. – № 8-1. – С. 146-153.

21. Щурина С.В., Данилов А.С. Искусственный интеллект как технологическая инновация для ускорения развития экономики // Экономика. Налоги. Право. – 2019. – № 12 (3). – С. 125-133.

Статья поступила в редакцию 20.09.2023

Статья принята к публикации 15.12.2023

УДК 004.932
EDN: MFQNZG

МЕТОДИКА РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЧИ И ДИАРИЗАЦИИ С ПОМОЩЬЮ МЭЛ-ЧАСТОТНЫХ КЕПСТРАЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ

© Автор(ы) 2023
SPIN: 6587-5550
AuthorID: 724810
ResearcherID: E-4462-2017
ORCID: 0000-0002-4014-8718
ScopusID: 56428568400

ЕФИМОВ Алексей Игоревич, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Электронные вычислительные машины»
Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина
(390005, Россия, Рязань, улица Гагарина, 59/1, e-mail: lexie62rus@mail.ru)

SPIN: 1201-5071
AuthorID: 681509
ORCID: 0009-0008-6543-253X

КУЗЬМИЧЕВ Даниил Романович, магистрант
Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина
(390005, Россия, Рязань, улица Гагарина, 59/1, e-mail: kuzmichev.dan-00@yandex.ru)

Аннотация. В данной статье поднимается важная проблема, связанная с представлением человеческой речи в контексте задач распознавания речи и диаризации. Задачи распознавания речи и диаризации крайне актуальны при проектировании систем голосового управления, распознавания аудиофайлов и преобразования их в текстовый формат представления. Несмотря на огромный прогресс в этой области, всё еще остаются проблемные вопросы, требующие дополнительного изучения. Авторы анализируют основные аспекты аудиосигнала, содержащего человеческую речь, включая его отдельные акустические характеристики и общую структуру. Основное внимание уделяется обоснованию и детальному описанию алгоритма преобразования исходного аудиосигнала в набор мэл-частотных кепстральных коэффициентов, при этом не только описываются технические аспекты алгоритма, но и его значимость при решении конкретных задач распознавания речи и диаризации. Оцениваются перспективы применения предложенного метода для обработки аудио сигналов, содержащих человеческую речь.

Ключевые слова: обработка аудио сигнала, преобразование Фурье, кепстр, форманты.

THE TECHNIQUE OF SPEECH RECOGNITION AND DIARIZATION USING MEL-FREQUENCY CEPSTRAL COEFFICIENTS

© The Author(s) 2023

EFIMOV Aleksey Igorevich, phd, associate professor of the Department of Electronic Computers
Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin
(390005, Russia, Ryazan, Gagarina street, 59/1, e-mail: lexie62rus@mail.ru)

KUZMICHEV Daniil Romanovich, master's student
Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin
(390005, Russia, Ryazan, Gagarina street, 59/1, e-mail: kuzmichev.dan-00@yandex.ru)

Abstract. This article raises an important problem related to the representation of human speech in the context of speech recognition and diarization tasks. Speech recognition tasks and diarization are extremely relevant when designing voice control systems, recognizing audio files and converting them into a text format. Despite the tremendous progress in this area, there are still problematic issues that require additional studying. The authors analyze the main aspects of the audio signal containing human speech, including its individual acoustic characteristics and general structure. The main attention is paid to a detailed description of the algorithm for converting the original audio signal into a set of low-frequency cepstral coefficients. The article not only describes the technical aspects of the algorithm, but also emphasizes its importance and effectiveness in the context of solving specific tasks of speech recognition and diarization. The article provides the reader with a complete understanding of the proposed method and its applicability in the context of processing audio signals containing human speech.

Keywords: audio signal processing, Fourier transform, kepstr, formants.

Для цитирования: Ефимов А.И. Методика распознавания речи и диаризации с помощью мэл-частотных кепстральных коэффициентов / А.И. Ефимов, Д.Р. Кузьмичев // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 12. – № 4(64). – С. 43-49. – EDN: MFQNZG.

Введение. Для решения задач автоматизации процессов, ключевым объектом которых является человеческая речь, будь то преобразование устной речи в текст (распознавание речи), или разметка по дикторам аудиофайла (диаризация), требуется привести изначальные аудиоданные в некий нормализованный для алгоритмизации вид. Важно при этом сохранить характеристики для различения определяющих речь атрибутов (фонем), от других звуков (музыка, посторонний шум и др.). Этот процесс вычисления универсальной метрики для решения задач в машинном обучении называется извлечением признаков (*feature extraction*).

Зарекомендовавшей себя на протяжении десятилетий и повсеместно используемой метрикой этих акустических признаков на данный момент признаны мэл-частотные кепстральные коэффициенты (*Mel-frequency cepstral coefficients – MFCC*). Зачастую именно вычисление набора этих коэффициентов является изначальной проблемой в задаче, связанной с распознаванием речи.

Методология. Прежде чем перейти к рассмотрению процесса вычислений *MFCC* и их значимости в задачах, связанных с распознаванием речи в широком смысле этого слова, необходимо рассмотреть сущность человеческой устной речи как таковой.

Сущность разговорной речи. С физической точки зрения, человеческая устная речь является звуковыми колебаниями, порождаемыми вибрацией голосовых связок и в частности особенностями строения голосового тракта, и воспринимаемыми органами чувств человека. Звуковые колебания поддаются описанию периодическими функциями, т.е. сложный звуковой сигнал можно представить как наложение простых гармонических сигналов с разными частотами, амплитудами и фазами. Также человеческая речь характеризуется наличием смысловых конструкций, построенных из наименьших единиц языка – слов. В устной речи слова выражаются последовательностью произносимых звуков – фонем, которые формируются из периодических (тонов) и непериодических (шумов) колебаний [1, 14]. Так или иначе, фонемы различаются между собой набором акустических параметров – высотой, силой, долготой, тембром [2].

Высота звука определяется частотой колебаний связок – чем больше колебаний происходит в секунду, тем выше звук. В системе СИ единицей измерения высоты звука (частоты колебаний) является герц (Гц). Диапазон частот мужского голоса при нормальной речи составляет 85-155 Гц, а женского – от 165 до 255 Гц.

Сила звука оценивается амплитудой колебаний и измеряется в децибелах (дБ). Сила звука шепота достигает 20-30 дБ, обычной речи – 40-60 дБ, сила крика доходит до 80-90 дБ. Но стоит отметить, что при должных вокальных навыках можно развить силу звука до 130 дБ.

Долгота характеризуется продолжительностью произнесения звука. Человек распознает звуки речи с длительностью не менее 30-50 миллисекунд.

Тембр из всех параметров является наиболее сложным и важным, так как он отражает индивидуальность процесса произнесения звуков. Тембр зависит от соотношения основной частоты и обертонов. Обертон – это дополнительная частота, возникающая при вибрации части голосового тракта. Обертоны обычно слабы, но усиливаются резонаторами (носовой и ротовой полостями). Интонация речи создается за счет изменения частоты основного тона, а тембр – путем изменения частоты обертонов. Тембр позволяет отличить один звук от другого, различать звуки, произносимые различными лицами, мужскую речь от женской. Каждый индивид имеет собственный тембр голоса [3].

Таким образом, в задачах распознавания и голоса, и речи основным объектом исследования являются особенности человеческого голосового тракта, так именно он ответственен за придание колебанию воздуха индивидуальности и формы, воспринимаемой как фонема.

Что касается форм представления звука, то вначале целесообразно представить исходный аудиосигнал в дискретном амплитудно-временном спектре (рис. 1), отражающем значение силы сигнала в децибелах за определенный квант. Данный способ часто используется во многих аудиофайлах с указанием частоты дискретизации и последовательности значений силы сигнала. Способ, однако, малоинформативен и не удобен для дальнейшей обработки сигнала, поскольку спектры даже одного и того же слова могут различаться. Справедливости ради стоит отметить, что существует ряд архитектур нейронной сети, соответствующих подходу *EndToEnd*, принимающих данные аудиофайла в амплитудно-временном отображении и осуществляющих преобразование через множество слоев [4, 5].

Поэтому предпочтителен способ представления аудиосигнала в виде амплитудно-частотного спектра, так как он облегчает анализ природы сигнала, связанной с индивидуальным характером тембра человеческого голоса и произнесением фонемы. Данный спектр формируется с помощью дискретного преобразования Фурье [6]:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-\frac{2\pi i k n}{N}}, 0 \leq k < N, \quad (1)$$

где N – количество отчетов, k – частота. Для предотвращения боковых лепестков при разрыве на границах заданного интервала применяется оконную функцию Хемминга (2).

$$H[k] = 0,54 - 0,46 \cos\left(\frac{2\pi k}{N-1}\right) \quad (2)$$

На подобной спектрограмме (рис. 2) можно увидеть отчетливые пики определенных частот – форманты. Форманта – это характеристика, напрямую описывающая прохождение звука по голосовому

тракту, представляющая из себя область частот, усиленных резонаторной системой вокального тракта. Первая форманта образует основной тон человеческого голоса, последующие описывают произносимые звуки [5].

Форманты формируются в основном при произношении человеком гласных звуков (рис. 3), в то время как, например, в согласных шипящих звуках явно преобладает шумовая составляющая (рис. 4).

Таким образом, для решения задач распознавания речи и диаризации частотный спектр предстоит привести к удобной для обработки методами

машинного обучения форме. Хотя на первый взгляд для решения этих задач должны использоваться разные акустические признаки, на самом деле обе они тесно связаны с исследованием зависящего от артикуляции тембра в рамках частотного спектра.

Подводя промежуточный итог, можно констатировать, что голос человека – это набор произносимых им фонем. Отсюда следует, что голос одного и того же человека в произносимой им речи на разных языках будет разным, так как набор фонем в каждом языке может отличаться, а это в свою очередь влияет на формирование тембра при произношении очередной фонемы.

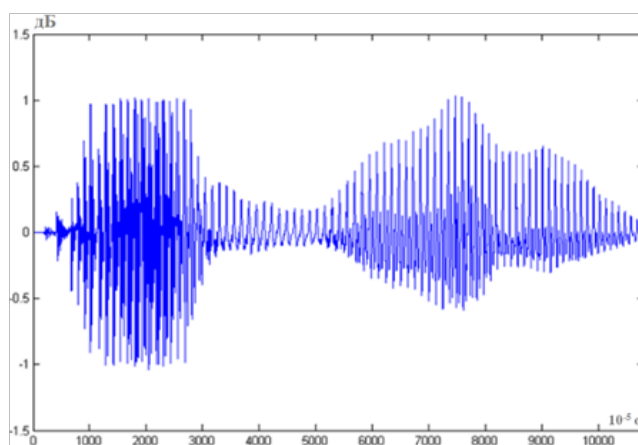


Рисунок 1 – Амплитудно-временной спектр

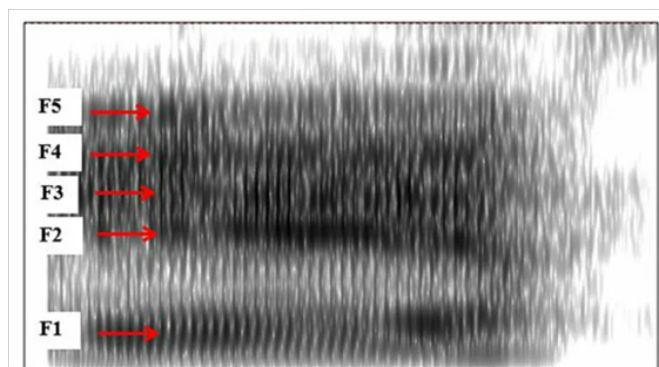


Рисунок 2 – Форманты на спектрограмме

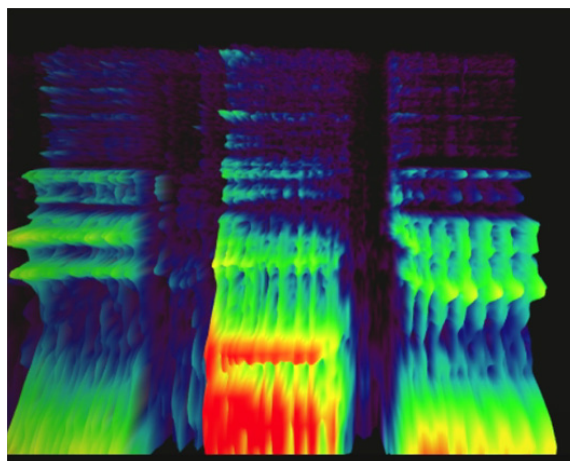


Рисунок 3 – Спектрограмма фонем «и», «а» и «э» соответственно

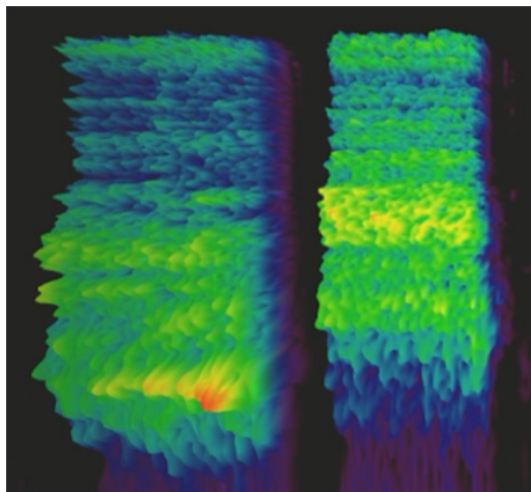


Рисунок 4 – Спектрограмма фонем «ш», «ц»

Обработка исходных данных. Как правило, перед началом какого-либо процесса, такого как передача или запись сигнала, диапазон входных частот, наиболее восприимчивый к шуму, расширяется. Данная операция называется предвысказанием (*pre-emphasis*). При приеме или извлечении сигнала применяется обратное преобразование (*de-emphasis*) с тем, чтобы выходной сигнал точно соответствовал исходному. При этом шум, сопровождающий сигнал в расширенном диапазоне, ослабляется на этапе устранения предвысказания. Предвысказание обычно используется в радиовещании и звукозаписи. Применение фильтрации улучшает качество распознавания речи [7].

В этапе извлечения акустических признаков первым шагом является введение в отфильтрованный сигнал предвысказания для усиления высоких частот, что обеспечивает [8]:

- получение сбалансированного спектра, так высокие частоты обычно имеют меньшую амплитуду, чем низкие частоты;
- устранение вычислительных проблем во время преобразования Фурье;
- улучшение отношения сигнала к шуму.

Фильтрация сигнала x может осуществляться фильтром первого порядка в соответствии с формулой:

$$y_i = x_i - b \cdot x_{i-1}, \quad (3)$$

где x_i – звуковой сигнал до фильтрации; y_i – сигнал после фильтрации; b – коэффициент фильтрации (обычно принимается значение $b = 0,95$).

Метод анализа звуковых данных с помощью мел-частотных кепстральных коэффициентов. Для вычисления мел-частотных кепстральных коэффициентов (*Mel-frequency cepstral coefficients – MFCC*) изначальный сигнал предварительно отфильтровывается согласно (3) для снижения влияния шумовых эффектов, возникающих в процессе обработки сигнала. Далее сигналограмма разделяется на отрезки с длительностью от 10 до 40 миллисекунд. Такая продолжительность позволяет

с достаточной точностью выделить различные фрагменты речи, детектировать как переходы фонем, так и смену диктора [9]. После этого производится дискретное преобразование Фурье (1) и полученный частотный спектр переводится в мел-частотный спектр в целях приближения описываемого процесса к порядку естественного распознавания речи человеком. Такой подход позволяет выделить частоты, которые наиболее значимы для человеческого восприятия, и осуществить своеобразную фильтрацию. В данной шкале (рис. 5) представлены тоны аппроксимированной функции, полученной из перцептивной оценки. Из графика следует, что с ростом частоты звуки становятся сложно различимыми по высоте.

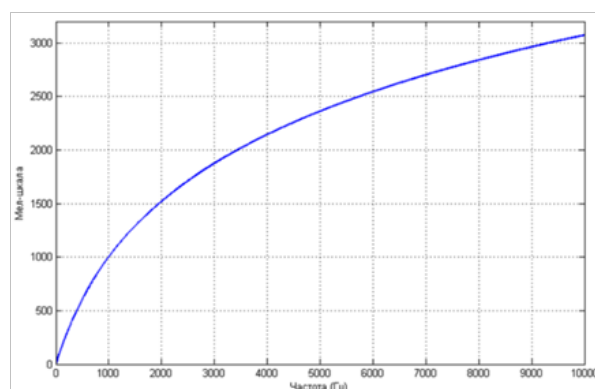


Рисунок 5 – Шкала мел

Сама функция перевода в мел имеет следующий вид:

$$m(f) = 1127 \log\left(1 + \frac{f}{700}\right), \quad (4)$$

где f – частота в герцах.

Из мел-шкалы (рис. 6 и 7) видно, как расширяется спектр в соответствии с понижением значимости частот и обеспечивается высокое разрешение на низких частотах, которые соответствуют естественной речи, в то время как роль высоких частот, присущих различным шумам, минимизируется.

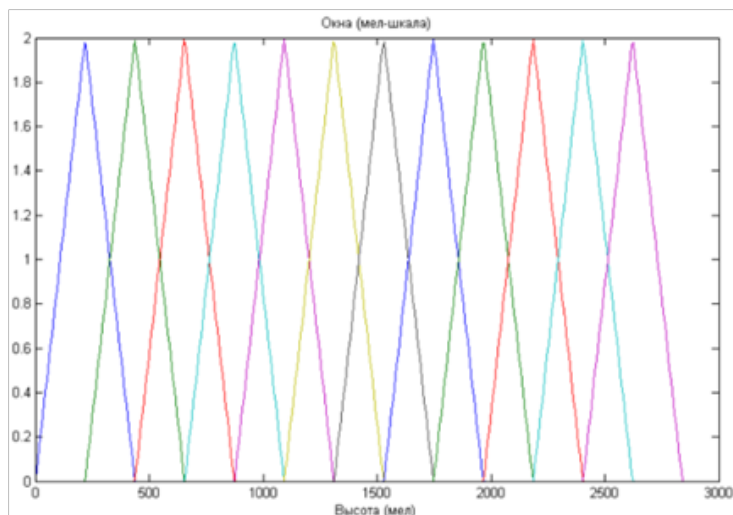


Рисунок 6 – Равномерное распределение фильтров на мел-шкале

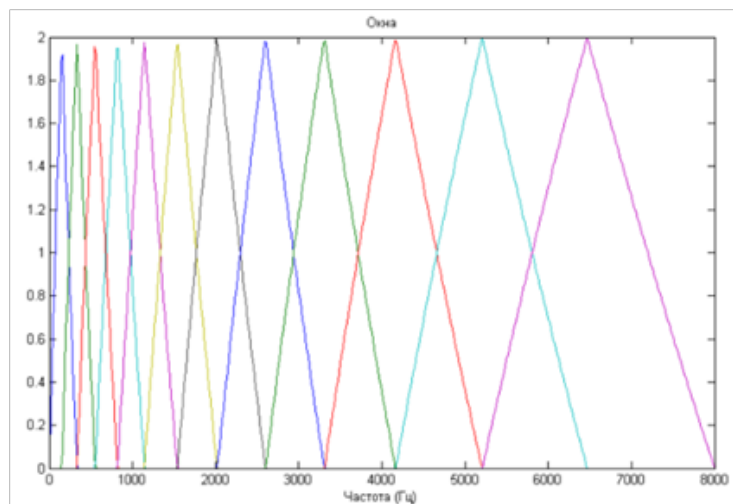


Рисунок 7 – Распределение фильтров на частотном спектре

По своей сути построенные мел-фильтры представляют собой треугольные оконные функции, осуществляющие повышение энергии сигнала в определённом диапазоне частот, что и позволяет получить мел-коэффициенты. Исходя из анализируемого диапазона частот и количества мел-коэффициентов M , можно задать набор таких фильтров (5).

$$H_m(f) = \begin{cases} \frac{m(f) - m_{begin}^s}{m_{center}^s - m_{begin}^s} & m(f) < m_{begin}^s \cup m(f) > m_{end}^s \\ \frac{m_{end}^s - m(f)}{m_{end}^s - m_{center}^s} & m_{begin}^s \leq m(f) < m_{center}^s \\ & m_{center}^s \leq m(f) \leq m_{end}^s \end{cases} \quad (5)$$

где $H_m(k)$ – s -й треугольный фильтр в мел-частотном диапазоне, определяемый по формуле; $m(f)$ – значение частоты в мэлах; m_{begin}^s , m_{center}^s , m_{end}^s – начало, центр и конец треугольного окна s -го мел-частотного фильтра, вычисляемые по формулам

$$\begin{aligned} m_{begin}^s &= m(f_{low}) + s \frac{m(f_{high}) - m(f_{low})}{M + 1} \\ m_{end}^s &= m(f_{low}) + (s + 2) \frac{m(f_{high}) - m(f_{low})}{M + 1} \\ m_{center}^s &= \frac{1}{2}(m_{begin}^s + m_{end}^s) \end{aligned} \quad (6)$$

Непосредственно фильтрация заключается в парном перемножении значений элементов фильтра со значениями спектра. Результатом этой операции является мел-коэффициент. Поскольку общее количество фильтров равно M , столько же будет и

коэффициентов. Однако мел-фильтры необходимо применять не непосредственно к значениям спектра, а к его энергии. После этого необходимо прологарифмировать полученные результаты (7), за счет чего снижается чувствительность получаемых

коэффициентов к шумам.

$$S[m] = \log \left(\sum_{k=0}^{N-1} |X[k]|^2 \cdot H_m[f] \right), 0 \leq m < M \quad (7)$$

Полученную спектрограмму можно сжать для удобства обработки, сохранив при этом все необходимые характеристики речи, приняв, что полученный частотный спектр является непрерывной функцией и применить дискретно-косинусное преобразование (8) с меньшей избыточностью получаемых значений:

$$C(n) = \sum_{m=0}^{M-1} S[m] \cos\left(\frac{\pi n(m+\frac{1}{2})}{M}\right), 0 \leq n \leq M, \quad (8)$$

где $S[m]$ – значение сигнала на мэл-шкале, m – отчет на мэл-шкале, n – количество кепстральных коэффициентов.

Результаты и обсуждение. Если предположить, что источник сигнала и форма голосового тракта относительно независимы, то речевой аппарат

человека можно представить в виде совокупности генератора гармонических сигналов, источника шумов и фильтров (9) [10-13]:

$$F(w) = S(w)H(w), \quad (9)$$

где $S(w)$ – изначальный вид акустической волны, а $H(w)$ – характеристика фильтра (зависит от параметров голосового тракта).

Произведение можно прологарифмировать, заменив его суммой (8):

$$\ln[S^2(w)H^2(w)] = \ln S^2(w) + \ln H^2(w) \quad (10)$$

Далее следует преобразовать эту сумму так, чтобы получить непересекающиеся наборы характеристик исходного сигнала и фильтра (рис. 8). С этой целью применим дискретно-косинусное преобразование (8) для получения коэффициентов сжатия спектра.

Получаемый спектр спектра называют кепстром (рис. 9). Получаемые значения можно использовать в качестве данных для решения обеих задач.

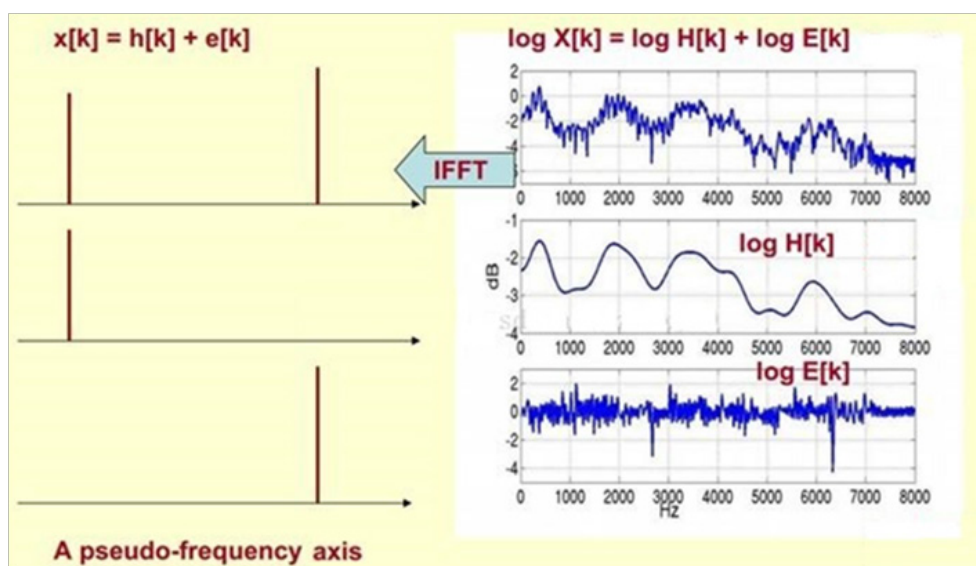


Рисунок 8 – Отделение огибающей формант от фильтра

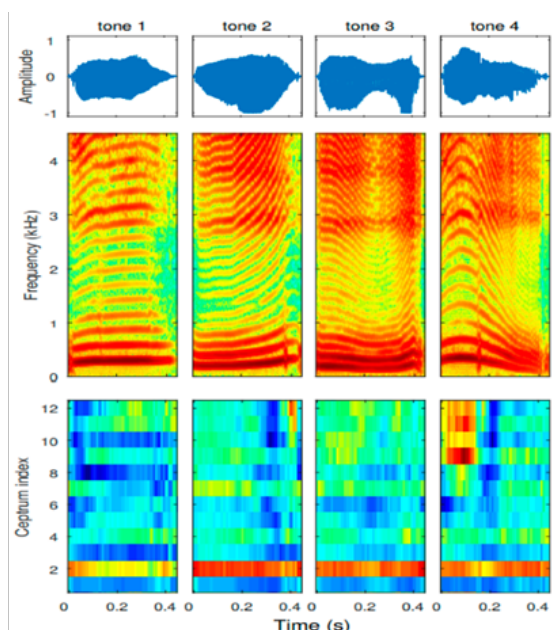


Рисунок 9 – Сравнение спектрограмм

Данный подход представляется наиболее эффективным и практичным ввиду следующих преимуществ:

- независимость длины вектора от полученного образца;
- близость к естественному механизму распознавания речи;
- относительная компактность из-за возможности ограничить количество коэффициентов;
- учет особенностей и индивидуальности процессов голосового тракта.

Кроме того, для учета динамики изменения тембра голоса можно добавить динамические функции, такие как "дельта" MFCC и "дельта-дельта" MFCC (производные первого и второго порядка).

Выводы. В данной статье рассмотрен один из популярных методов представления аудиосигнала в виде набора мел-частотных кепстральных коэффициентов (MFCC), представляющего собой мощный инструмент анализа звука не только в технике распознавания речи, но и в задачах музыкальной классификации и др.

Рассмотрена структура аудиосигнала и методика вычисления MFCC, включающая предварительную обработку аудиосигнала, расчет спектрограммы, применение фильтров мел-шкалы, логарифмирование и дискретное косинусное преобразование. Предложенная методика позволяет преобразовать сложные сигналы из временной области в компактный и информативный набор коэффициентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Камалова Л.А. Фонетика. Полный конспект лекций [Электронный ресурс] / Камалова Л.А. // Электронный архив КФУ. – Режим доступа URL: https://dspace.kpfu.ru/xmlui/bitstream/handle/net/22004/20_217_A5kl-000650.pdf (дата обращения: 12.11.2023).
2. Helpiks. Акустика звуков речи [Электронный ресурс]. – Режим доступа URL: <https://helpiks.org/6-7942.html> (дата обращения: 22.10.2023).
3. Тарасов А.С. Тон и тембр различия голосовых характеристик / Тарасов А.С. [Электронный ресурс] // Ответы на разные вопросы: [сайт]. – URL: <https://mypunto.ru/ton-i-tembr-razlichiya-golosovyh-harakteristik> (дата обращения: 12.11.2023).
4. Wang, Dong & Wang, Xiaodong & Lv, Shaohe. (2019). An Overview of End-to-End Automatic Speech Recognition. *Symmetry*. 11. 1018. 10.3390/sym11081018.
5. Рамзина И. Что такое форманты? [Электронный ресурс] // Вокальная механика. – Режим доступа URL: https://vocalmechanika.ru/m/03_002_chto_takoe_formanty.php (дата обращения: 17.09.2023)
6. Щелбанин, А.В. Алгоритмы преобразования Фурье и их применение при анализе звуковой информации / А.В. Щелбанин, Л.А. Зинченко. – Текст: непосредственный // Молодой ученый. – 2016. – № 20 (124). – С. 29-34. – URL: <https://moluch.ru/archive/124/34105/> (дата обращения: 07.12.2023).
7. Loweimi, Erfan & Ahadi, Seyed Mohammad & Drugman, Thomas & Loveymi, Samira. (2013). On the Importance of Pre-emphasis and Window Shape in Phase-Based Speech Recognition. 7911. 160-167. 10.1007/978-3-642-38847-7_21.
8. Волохов В.А., Лаврентьева Г.М., Новосёлов С.А., Матвеев Ю.Н. Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Распознавание диктора». – СПб: Университет ИТМО, 2022. – 86 с.
9. Mporas, I. Examining the Influence of Speech Frame Size and Number of Cepstral Coefficients on the Speech Recognition Performance [Electronic resource] / I. Mporas, T. Ganchev, I. Kotinas, N. Fakotakis // ResearchGate. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/profile/TodorGanchev/publication/239546404_Examining_the_Influence_of_Speech_Frame_Size_and_Number_of_Cepstral_Coefficients_on_the_Speech_Recognition_Performance
10. Распознавание речи-понимание MFCC [Электронный ресурс] // russianblogs. URL: <https://russianblogs.com/article/1220415980/> (дата обращения: 17.09.2023)
11. Мел-кепстральные коэффициенты (MFCC) и распознавание речи [Электронный ресурс] // habr. – Режим доступа URL: <https://habr.com/ru/post/140828/> (дата обращения: 17.09.2023)
12. Воробьева, С.А. Выделение границ фонем речевого сигнала с помощью мел-частотных спектральных коэффициентов / С.А. Воробьева. – Текст: непосредственный // Молодой ученый. – 2017. – № 13 (147). – С. 2-6. – URL: <https://moluch.ru/archive/147/41443/> (дата обращения: 11.01.2023).
13. Huang, Xuedong & Acero, Alex & Hon, Hsiao-Wuen. (2001). *Spoken Language Processing: A Guide to Theory, Algorithm, and System Development*.
14. Li, Jinyu & Deng, li & Haeb-Umbach, Reinhold & Gong, Yifan. (2016). *Fundamentals of speech recognition*. 10.1016/B978-0-12-802398-3.00002-7.

Статья поступила в редакцию 22.09.2023

Статья принята к публикации 15.12.2023

УДК 629.78+004.045

EDN: GWRRMX

ЦИФРОВОЙ АДАПТЕР ПОДКЛЮЧЕНИЯ АППАРАТНОГО КОНТРОЛЛЕРА *SPACEWIRE* К ПЭВМ

© Авторы 2023

SPIN: 2907-4092

AuthorID: 591719

ORCID: 0000-0002-8618-9822

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

Пензенский государственный университет

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

SPIN: 5470-1289

AuthorID: 650911

ORCID: 0000-0002-3358-4394

МАРТЫШКИН Алексей Иванович, кандидат технических наук, доцент,

заведующий кафедрой «Программирование»

Пензенский государственный технологический университет

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

SPIN: 2177-7806

AuthorID: 644943

ORCID: 0000-0003-0989-3928

ТРОКОЗ Дмитрий Анатольевич, доктор технических наук, доцент, проректор по научной работе

Пензенский государственный технологический университет

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

SPIN: 7126-7682

AuthorID: 428445

ORCID: 0000-0003-3176-0531

САЛЬНИКОВ Игорь Иванович, доктор технических наук, профессор,

профессор кафедры «Программирование»

Пензенский государственный технологический университет

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

Аннотация. Статья посвящена разработке специализированного адаптера с аппаратным контроллером *SpaceWire* для подключения к персональному компьютеру через порт USB. Цифровой адаптер обеспечивает высокоскоростную двунаправленную передачу данных в соответствии со стандартами *SpaceWire*. Среди способов синтеза и практической реализации предпочтительным признана технология программируемых вентильных матриц (ПЛИС), обладающая достаточной производительностью и гибкостью. Обоснован выбор для этой цели ПЛИС *Spartan 6* фирмы *Xilinx* и USB-моста FT2232H фирмы FTDI. Результатом исследования стал проект, синтезированный в программно-аппаратной системе проектирования ISE *Design Suite 14*. Цифровой адаптер предоставляет возможность мониторинга данных, отправки тестовых пакетов и совместим с протоколом ECSS-E-ST-50-12C. Экспериментальная проверка устройства демонстрирует практическую идентичность снятых сигналограмм временным диаграммам, полученным при эмуляции устройства на ЭВМ. Рассмотрены особенности работы с буферами FIFO, управления тайм-кодами, и представлены потенциальные сферы применения адаптера, включая космические и авиационные системы, связанные сети *SpaceWire*, и радиоэлектронную аппаратуру общего назначения. Полученные результаты работы открывают перспективы применения предложенной реализации цифрового адаптера для развертывания коммуникационных сетей и обеспечения взаимодействия различных систем на борту космического аппарата.

Ключевые слова. Бортовое оборудование, буфер FIFO, запись, интерфейс, информационный обмен, ПЛИС, цифровой адаптер, чтение, *SpaceWire*, VHDL.

DIGITAL ADAPTER FOR CONNECTING THE SPACEWIRE HARDWARE CONTROLLER TO A PERSONAL COMPUTER

© The Authors 2023

SINEV Mikhail Petrovich, candidate of technical sciences, docent of the Computer Engineering Department

Penza State University

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

MARTYSHKIN Alexey Ivanovich, candidate of technical sciences, docent, head of Programming Department

Penza state technological University

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

TROKOZ Dmitry Anatolyevich, doctor of technical sciences, docent,

vice-rector for scientific work, professor of Programming Department

Penza State Technological University

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

SALNIKOV Igor Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, professor of Programming Department

Penza State Technological University

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

Abstract. The article is devoted to the development of a specialized adapter with a hardware SpaceWire controller for connection to a personal computer via USB port. The digital adapter provides high-speed bidirectional data transmission in accordance with SpaceWire standards. Among the methods of synthesis and practical implementation, the technology of programmable valve matrixes (FPGA), which has sufficient performance and flexibility, is recognized as preferable. The choice of FPGA Spartan 6 from Xilinx and USB-bridge FT232RL from FTDI was justified for this purpose. The result of the study was a design synthesized in the hardware and software design system ISE Design Suite 14. The digital adapter provides the ability to monitor data, send test packets and is compatible with the ECSS-E-ST-50-12C protocol. Experimental verification of the device demonstrates the practical identity of the captured signalograms to the time diagrams obtained when emulating the device on a computer. The peculiarities of working with FIFO buffers, timecode management are considered, and potential applications of the adapter are presented, including space and aviation systems, SpaceWire interconnected networks, and general-purpose radio-electronic equipment. The results of the work open the prospects of application of the proposed realization of the digital adapter for deployment of communication networks and ensuring the interaction of various systems on board a spacecraft.

Keywords. Onboard hardware, FIFO buffer, write, interface, information exchange, *FPGA*, digital adapter, read, *SpaceWire*, *VHDL*.

Для цитирования: Синева М.П. Цифровой адаптер подключения аппаратного контроллера *SpaceWire* к ПЭВМ / М.П. Синева, А.И. Мартышкин, Д.А. Трокоз, И.И. Сальников // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 12. – № 4(64). – С. 50-58. – EDN: GWRRMX.

Введение. Поступательное развитие аэрокосмической техники направлено на улучшение показателей как оборудования, так и интерфейсов, применяемых в системах космического бортового оборудования (КБО). Несомненно, в этих системах передача информации играет роль ключевого компонента. В современном мире широко используются технологии, такие как *ARINC664* и другие, для внутрисистемных интерфейсов. Построение КБО на последовательных внутрисистемных интерфейсах требует устройств, которые бы обеспечивали взаимодействие между разнопроизводительными КБО.

Цель данного исследования заключается в разработке специализированного адаптера, предназначенного для подключения к персональному компьютеру через порт *USB*. Этот адаптер оснащен аппаратным контроллером *SpaceWire* и способен обеспечивать высокоскоростную двунаправленную передачу данных, соответствуя при этом стандартам технологии *SpaceWire* [1-4]. Предлагаемый адаптер представляет собой ценный инструмент для применения в процессах тестирования и отладки сети *SpaceWire* и ее узлов. Он обеспечивает возможность мониторинга всех передаваемых по сети пакетов данных и отправки необходимых пакетов для проведения тестов. Кроме того, это устройство способно работать посредством протокола *ECSS-E-ST-50-12C*. Примем, что для реализации технологии *SpaceWire* используется программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС) типа *FPGA Spartan 6* от компании *Xilinx*. Это решение оправдывается с экономической точки зрения при ограниченных тиражах производства изделий.

Отправка и получение пакетов с ПЭВМ произ-

водится через аппаратный мост *USB-FIFO*. Дальнейшая передача пакетов в канал *SpaceWire* обеспечивается контроллером *SpaceWire*, реализованном на ПЛИС. Управление и отладка осуществляется с помощью персонального компьютера, соединенного с разрабатываемым устройством по стандарту *USB 2.0*. Адаптер обязан выполнять следующие функции: соблюдение стандарта *SpaceWire ECSS-E-ST-50-12C*; аппаратное обнаружение ошибок в связи, таких как разрыв соединения и ошибки четности; возможность программной настройки скорости передачи данных; работа в дуплексном режиме. Также необходимо разработать текстовое описание проекта ПЛИС на языке *VHDL-1993*.

Методология. Интерфейс *USB* является последовательным интерфейсом передачи данных для среднескоростных и низкоскоростных периферийных устройств в вычислительной технике. Компания *FTDI* специализируется на разработке, производстве и обслуживании устройств и программных драйверов для преобразования последовательных данных, передаваемых через интерфейс *RS-232* с уровнями *TTL*, в сигналы, совместимые с шиной *USB*. В книге «*USB в электронике*» издательства «БХВ-Петербург» [5], представлена практическая область использования аппаратного моста *USB-FIFO*, разработанного компанией *FTDI*. По сути *USB* стал универсальным интерфейсом, охватывая практически все сферы компьютерных технологий, включая стандарты автомобильных магнитол с *USB*-портом для подключения *FLASH* памяти, в цифровых спутниковых приемниках с возможностью обновления через *USB*, а также в современных сотовых телефонах с *MP3*-плеерами и интегрированными камерами, оснащенными

USB-портом.

Кодирование информационного потока и обмен данными с ПЭВМ успешно осуществляется с помощью ПЛИС семейства *Spartan-6* от *Xilinx* [6-11], программируемых с применением систем автоматизированного проектирования (САПР) на языке *VHDL*. Этот язык использован и в настоящей работе, где ставится задача разработать адаптер, подключаемый к персональному компьютеру через USB-порт и оснащенный аппаратным контроллером для двунаправленной передачи данных по каналу в соответствии со стандартом *SpaceWire* [12-14]. Рассмотрим некоторые варианты реализации данного устройства.

В сети *SpaceWire* узлы-абоненты представляют собой специально разработанные устройства передачи и приема данных [15], обеспечивающие соединение с маршрутизирующим коммутатором

или другими узлами сети посредством специализированных двунаправленных каналов, известных как «линки». Каждый узел оборудован одним или несколькими линк-портами и интерфейсом обмена данными с хост-устройствами – процессорным модулем, датчиком, исполнительным устройством, периферийным контроллером и пр. Каждый узел принимает данные от хост-устройства, кодирует их и передает через свой передатчик, который напрямую соединен с линком. Контроллер линка в сети *SpaceWire* выполняет важные задачи, включая управление установлением связи, регулирование потока данных в канале, обнаружение разрывов соединения и восстановление после сбоев. Обычно весь набор протоколов *SpaceWire* реализуется внутри контроллера линка. На рисунке 1 показана типовая структура контроллера *SpaceWire*.

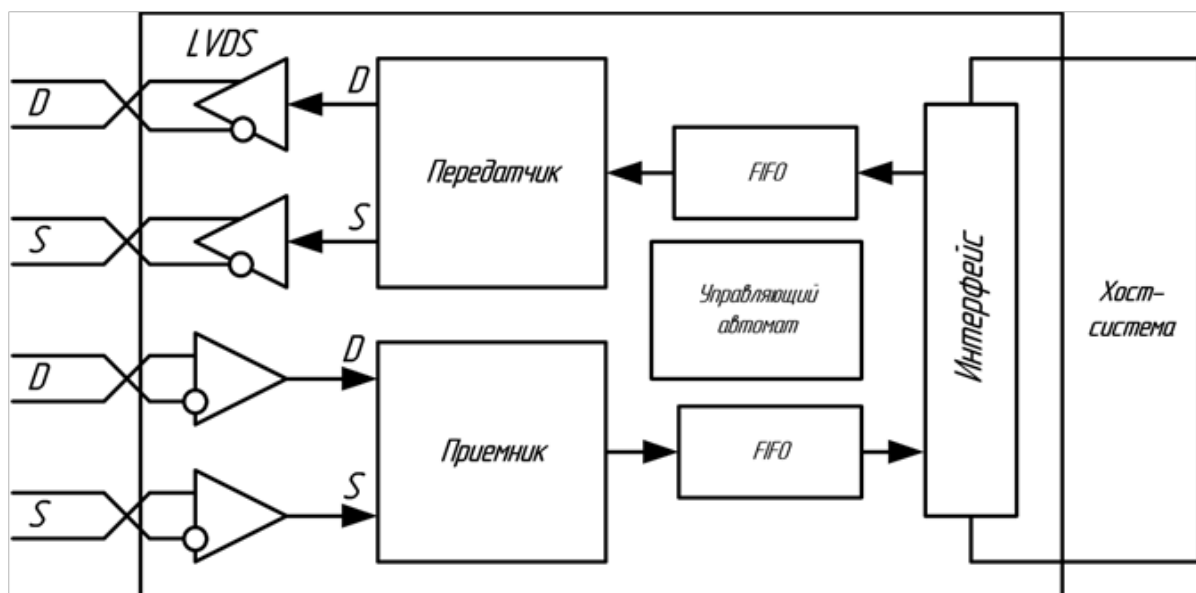


Рисунок 1 – Типовая структура контроллера *SpaceWire*

Известны варианты реализации технологии *SpaceWire* с применением отечественных компонентов. Один из них – модифицированный сигнальный процессор МС-24R на базе микросхемы 1892ВМ2Я, который включает в свой состав два контроллера *SpaceWire*, обеспечивающие двусторонний информационный обмен со скоростью от 2 до 400 Мбит/с в каждом направлении по каналам *SpaceWire* [16]. Как альтернативу можно рассматривать использование *RISC*-микроконтроллера МСТ-01 с архитектурой *MIPS32*, обладающего 64-битным аккумулятором с плавающей точкой и двумя контроллерами *SpaceWire*, что обеспечивает возможность прямого взаимодействия с сетью *SpaceWire*.

Для соединения устройств, в которых нет встроенных контроллеров *SpaceWire*, непосредственно с сетью *SpaceWire* разработан многоканальный контроллер пакетной передачи данных МСВ-01, поддерживающий подключение к линкам 4 каналов через *USB* интерфейс. Кроме того, в состав МСВ-01 входит

доступная для пользовательских программ двухпортовая *DPRAM* память объемом 2 Мбит.

Следует отметить, что для реализации и поддержки *SpaceWire* также применяются ПЛИС типа *FPGA* (*Field Programmable Gate Array* – программируемая полем вентиляльная матрица), что с экономической точки зрения является практичным решением, особенно при ограниченных объемах производства. В этом случае контроллер *SpaceWire* можно реализовать в виде *IP*-блока, который легко встраивается в проект на *FPGA*, обеспечивая компактность и экономичность *SpaceWire*-оборудования (рис. 2).

IP-блок представляет собой полнофункциональный контроллер канала *SpaceWire*, охватывающий в своем функционале *DS*-кодирование, символическое кодирование, управление соединением, регулирование потока данных, обработку ошибок, а также обработку временных кодов и кодов распределенных прерываний. Этот контроллер располагает удобным интерфейсом для передачи и приема потоков данных,

обеспечивая при этом локальную синхронизацию и управляющие сигналы, включая сигнал окончания передачи. Данный интерфейс значительно упрощает интеграцию IP-блока с буферами *FIFO* или другими источниками и приемниками данных, таким как аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи.

Для создания устройства выбран вариант использования ПЛИС из семейства *Spartan-6*, производительность которой идеально подходит для реализации высокоскоростного интерфейса *SpaceWire* [17-19]. Связь с адаптером устанавливается посредством *USB 2.0* с использованием аппаратного моста, что представляется наиболее простым решением с точки зрения программной реализации, так как не требует разработки драйвера для устройства.

Для обеспечения информационной связи между разрабатываемым устройством и ПЭВМ необходим

аппаратный мост, поддерживающий *USB 2.0* стандарт. Память выполненного на ПЛИС контроллера линия *SpaceWire* основана на технологии *SRAM*, поэтому требуется ее перезагрузка при каждом включении устройства в процессе инициализации системы или для изменения конфигурационных данных. Для хранения файла конфигурации используется программируемое ПЗУ, которое можно настраивать в системе посредством интерфейса *JTAG*. С целью повышения помехоустойчивости битовые последовательности, сформированные в канале *SpaceWire* передатчиком, преобразуются в сигналы приемопередатчиком *LVDS*. Эти сигналы представляют собой дифференциальные сигналы низкого уровня в соответствии со стандартами *TIA/EIA-644* и *IEEE 1596.3*. На основе данных соображений разработана изображенная на рисунке 3 структурная схема.

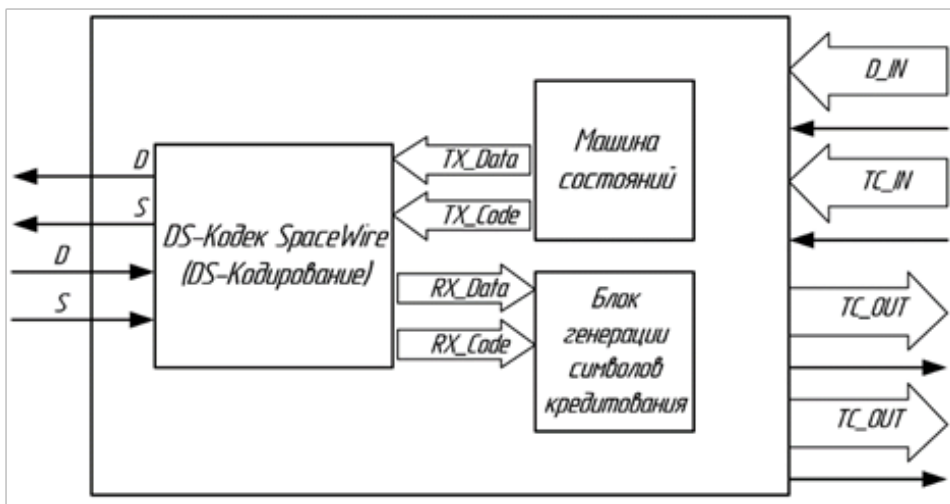


Рисунок 2 – Архитектура IP-блока *SpaceWire*-контроллера

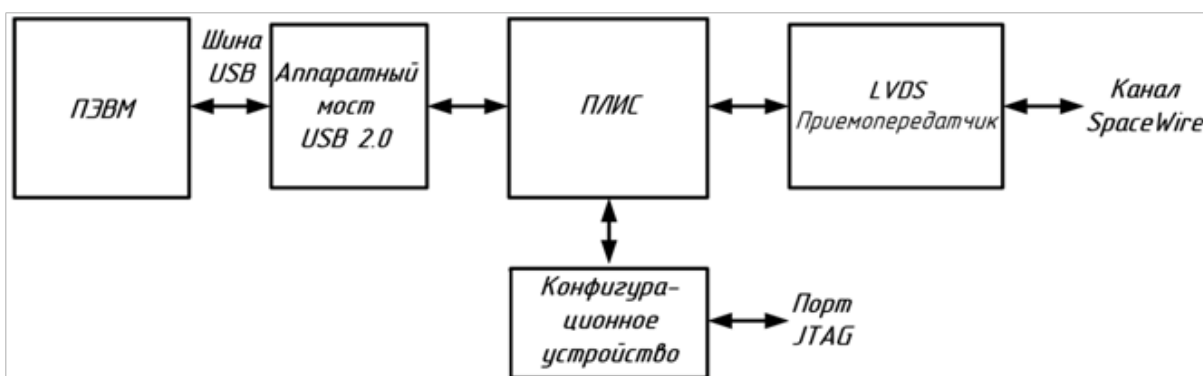


Рисунок 3 – Структурная схема адаптера

Представленная на рисунке 4 схема адаптера включает в свой состав следующие компоненты:

- микросхема *USB FT2232H* компании *FTDI*;
- ПЛИС компании *Xilinx* модели *XC6SLX4* из семейства *Spartan-6*;
- конфигурационное ПЗУ объемом 4 Мбит модели *XC9504S*;
- тактовый генератор импульсов с частотой 100 МГц;

- стабилизаторы и фильтры питающих напряжений;
- приемопередатчик *LVDS K5559IИ19V*.

Аппаратный мост реализован с использованием микросхемы *FT2232H* от *FTDI*, он обеспечивает подключение по *USB*. Микросхема *FT2232H* обеспечивает высокоскоростной обмен данными через две независимые параллельные двунаправленные шины с высокой пропускной способностью. Одна

шина используется для управления устройством и считывания флагов состояния, а другая – для двунаправленной передачи данных. ПЛИС выполняет функцию IP-блока *SpaceWire*-контроллера, что позволяет осуществлять передачу данных между ПЭВМ и аппаратным мостом *USB-FIFO* [20]. Для согласования уровней сигналов данных используется двухканальная микросхема приемопередатчика LVDS. Блок питания ПЛИС включает в себя набор стабилизаторов, обеспечивающих нужные уровни питающего напряжения и необходимую нагрузочную способность. Для снижения высокочастотных помех, возникающих при переключении цифровых элементов, для каждого блока устройства при трассировке печатной платы предусмотрены отдельные шины питания и линии связи минимальной длины, при этом каждый блок снабжен фильтрующими питание конденсаторами.

При инициализации контроллера, программное обеспечение, хранимое в конфигурационной памяти, автоматически загружается в ПЛИС. Для процедуры программирования предусмотрен специальный кабель, соединяющий разъем *JTAG* контроллера с портом *USB* персонального компьютера, с которого поступает поток конфигурации.

Микросхема ПЛИС как ядро устройства организует информационный обмен между пользователем ПЭВМ и сетью *SpaceWire*. Для сопряжения ПЛИС с интерфейсом *USB* используется микросхема *FTDI* типа *FT2232H*, освобождающая пользователя от необходимости беспокоиться об актуальности драйвера и ПО компьютера. Для обеспечения максимальной пропускной способности управление устройством и передача данных осуществляются через два независимых канала *FIFO*.

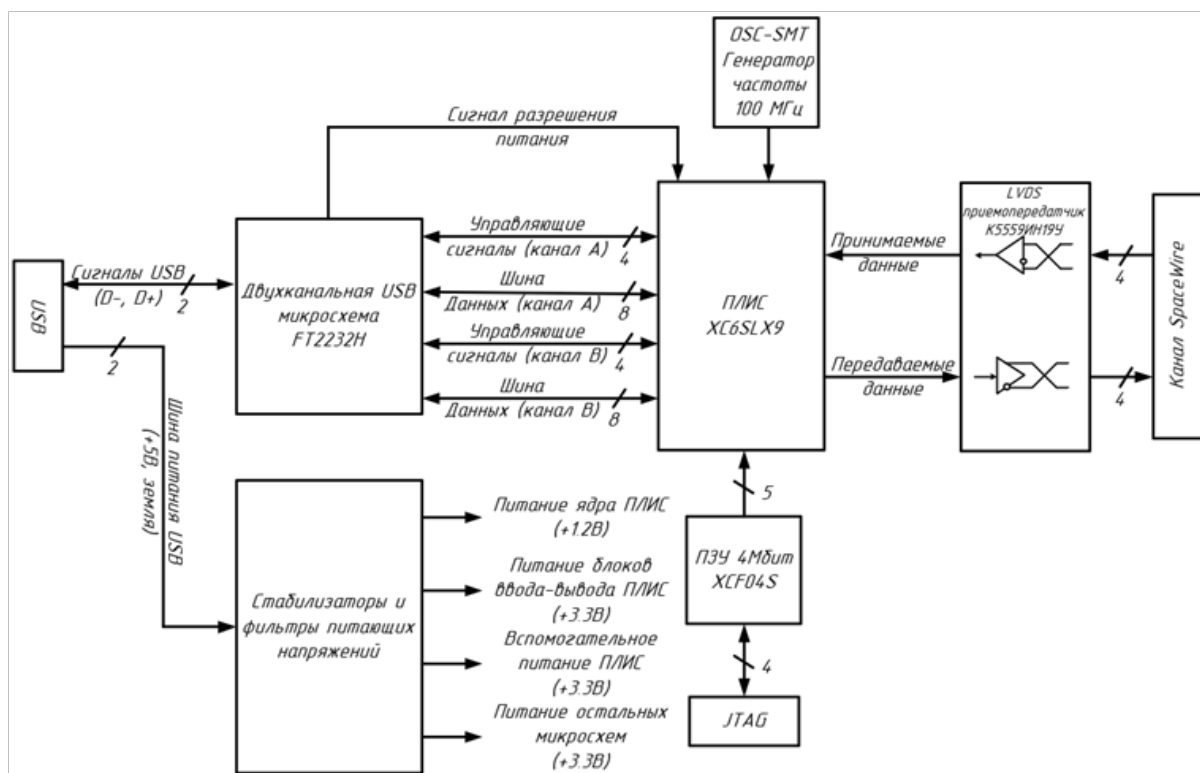


Рисунок 4 – Электрическая функциональная схема разрабатываемого устройства

Основные характеристики микросхемы *XC6SLX4*, изготовленной по 45-нанометровой технологии [21] представлены в таблице 1. Микросхема соответствует бюджетному сегменту архитектуры *FPGA* компании *Xilinx*, в которой каждый конфигурируемый логический блок (КЛБ) связан с коммутирующей матрицей и снабжен цепями, необходимыми для передачи данных к смежным КЛБ и блокам ввода-вывода (БВВ), структура их включает две секции *Slice*: *SLICEX* и *SLICEM* или *SLICEL* (рис. 5). *SLICEM* – многофункциональный блок с таблицами преобразования (*LUT*), конфигурируемыми во всех режимах, а также линиями ускоренного переноса. В его состав входит че-

тыре таблицы преобразования *LUT-6*, каждая оборудована шестью входами и способна выполнять логические операции, реализовывать сдвиговые регистры или функциональные блоки распределенной памяти (*distributed RAM*), объемом 64 бита. Этот блок также содержит цепи быстрого переноса, расширяемые мультиплексоры и восемь регистров для хранения результатов вычислений. *SLICEL* – *LUT* настраивается только как логический генератор, есть цепи ускоренного переноса. Он предоставляет те же ресурсы, что и *SLICEM*, за исключением сдвиговых регистров и блоков распределенной памяти. *SLICEX* – *LUT* настраивается только как логический генератор,

нет цепей ускоренного переноса. Он предоставляет исключительно ресурсы для реализации логических функций, что снижает нагрузку на ячейку, и

приводит к уменьшению числа цепей трассировки, а также к уменьшению времени распространения сигнала.

Таблица 1 – Характеристики микросхемы XC6SLX4

Характеристика	
Секции (4 6-LUT + 8 FF)	600
Логические ячейки	3840
Триггеры	4800
Распределённая память (макс.), кбит	216
Контакты (макс.)	132

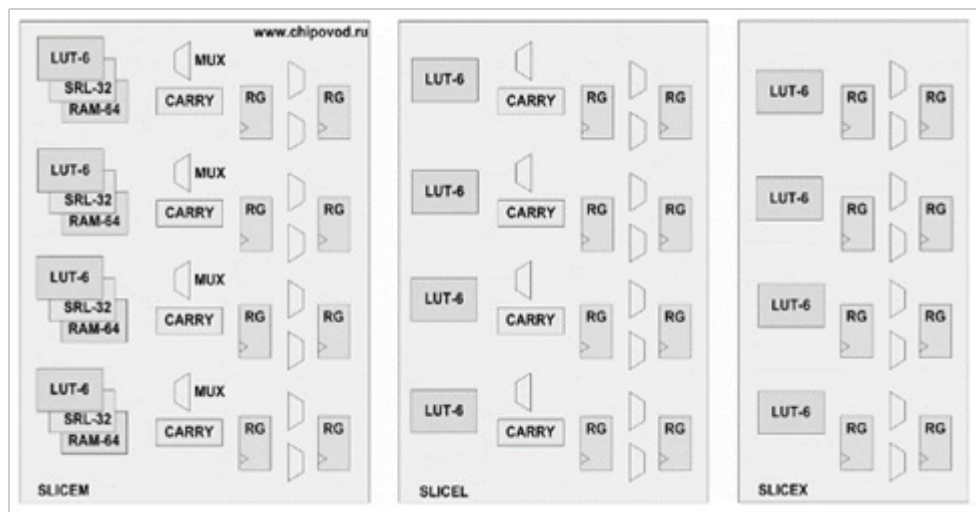


Рисунок 5 – Состав КЛБ

Результаты. Синтез проекта проводился в САПР *ISE Design Suite 14* и включал следующие файлы:

- *gen_mod.vhd*. Основной модуль верхнего уровня проекта. Модуль связывает между собой контроллер *SpaceWire* и два модуля обмена по шине асинхронного *FIFO*;

- *ft245.vhd*. Модуль содержит описание конечного автомата, реализующего взаимодействие с внешней *USB* микросхемой *FT2232H* по принципу доступа к асинхронному *FIFO*;

- *spwstream.vhd*. Модуль, описывающий схему контроллера *SpaceWire*.

Модуль контроллера *SpaceWire* представлен в виде совокупности входящих в него частей:

- *spwlink.vhd*. Автомат управления соединением;
- *spwpkg.vhd*. Вспомогательный *VHDL* пакет;
- *spwram.vhd*. Синхронная двухпортовая *RAM* с раздельным тактированием портов чтения и записи;
- *spwrecv.vhd*. Приемник *SpaceWire*;
- *spwrecyfront_generic.vhd*. Обёртка для приёмника *SpaceWire* осуществляющая подтверждение достоверности передаваемого бита данных;
- *spwxmit.vhd*. Передатчик *SpaceWire*;
- *syncdff.vhd*. Синхронизатор на двух последовательно соединённых *D*-триггерах.

Модуль взаимодействия с внешней *USB* микросхемой. В проекте предусмотрено два модуля для передачи данных по двум независимым шинам и, следовательно, обеспечения максимальной

пропускной способности шин. Модуль содержит настроечные константы, задающие временные интервалы ожидания в циклах чтения и записи данных по асинхронной шине. На рисунке 6 представлена граф-схема управляющего автомата.

Управляющий автомат включает в себя шесть различных состояний. После отключения сигнала сброса, автомат находится в исходном состоянии *IDLE* – режиме ожидания следующей транзакции. После поступления сигнала *rx*, разрешающего чтение данных из микросхемы моста *USB-FIFO*, происходит переход в состояние *READ_DATA*. В этом состоянии происходит запуск отсчёта интервала *RDWAIT* для чтения гарантированных данных с шины. По окончании отсчёта интервала происходит переход в следующее состояние *WAIT_RD2RD*. При этом прочитанные данные заносятся в буферный регистр, и активизируется цикл передачи их внутренним модулям. В состоянии *WAIT_RD2RD* происходит отсчёт времени, необходимого для завершения текущей транзакции чтения *FIFO* и запуском новой. По окончании отсчёта при поступлении запроса от внутренних модулей происходит переход в первоначальное состояние *IDLE*. В этом состоянии осуществляется проверка сигнала разрешения записи в *FIFO*. Как только разрешение будет получено, автомат переходит в состояние *WRITE_DATA*. В состоянии *WRITE_DATA* активизируется запись в *FIFO* данных от внутренних

модулей и осуществляется отсчёт интервала *WRWAIT* для гарантированной их записи. По окончании отсчёта осуществляется переход в состояние *WAIT_WR2WR*, когда активируется сигнал подтверждения на окончание цикла запроса передачи данных от внутренних модулей. В состоянии *WAIT_WR2WR* осуществляется отсчёт времени, необходимого для завершения текущей транзакции записи *FIFO* и началом новой. По окончании отсчёта происходит переход в состояние *IDLE*.

Модуль контроллера *SpaceWire* представлен на рисунке 7.

Модуль «*spwstream*» включает в себе законченную схему *SpaceWire* контроллера с простым интерфейсом на основе *FIFO*. Он состоит из приемника, передатчика, автомата управления соединением и *FIFO*. Входные и выходные потоки данных обрабатываются как последовательности символов. Блоки *FIFO* являются двухпортовыми *RAM* блоками разрядностью 9 бит (8 битов данных и 1 бит – флаг). Глубину *FIFO*, можно изменить с помощью настроечных констант. Блоки *FIFO* сохраняют своё содержимое даже при потере связи. Только полный сброс модуля очищает буфер *FIFO*.

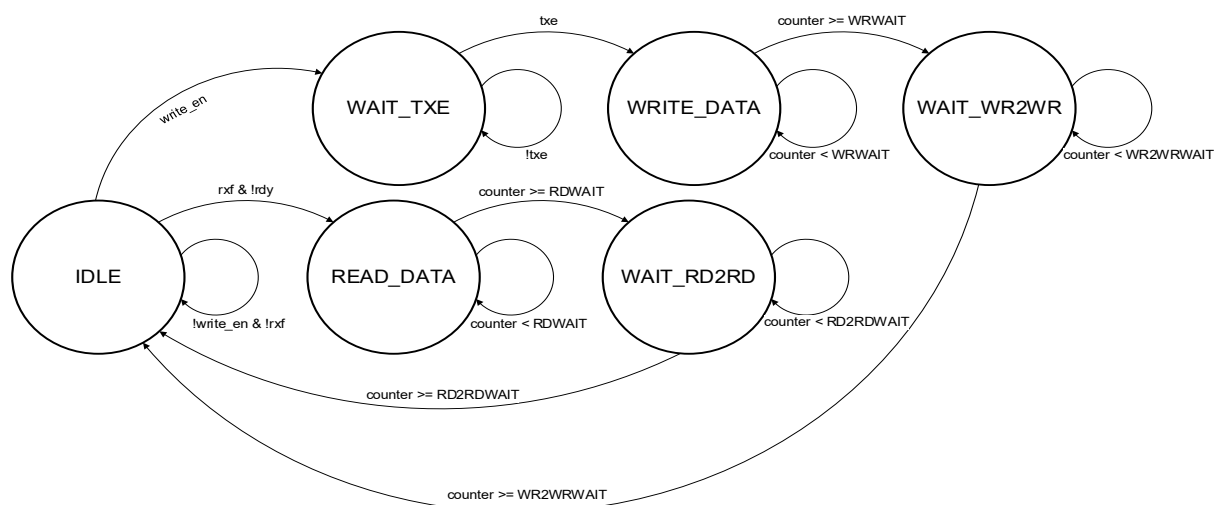


Рисунок 6 – Граф-схема автомата для управления

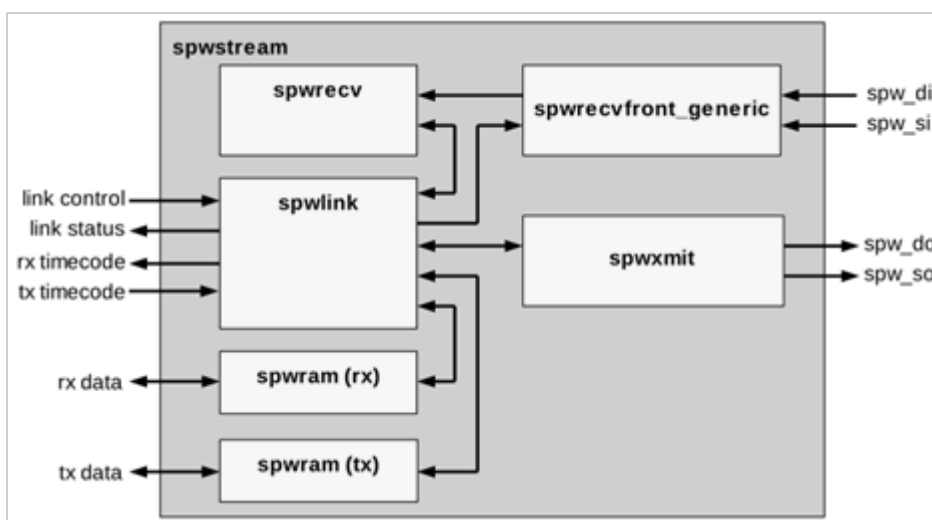


Рисунок 7 – Блок-схема модуля контроллера *SpaceWire*

Все входные и выходные сигналы за исключением *SpaceWire* сигналов изменяются синхронно по фронту сигнала CLK. Это не гарантирует полное отсутствие ложных импульсов в промежутки между активными фронтами тактового сигнала. Чтение из приемного *FIFO* осуществляется взаимодействием сигналов *rxvalid* и *rxread*. Символ принимается из *FIFO*, когда оба

сигнала *rxvalid* и *rxread* присутствуют в момент нарастающего фронта тактового сигнала. На рисунке 8а, три символа передаются по фронту тактового импульса.

Запись в передающее *FIFO* осуществляется взаимодействием сигналов *txrdy* и *txwrite*. Символ записывается в буфер *FIFO*, когда сигналы *txrdy* и *txwrite* действительны в момент фронта тактового

сигнала. На рисунке 8, б передача четырех символов осуществляется по фронту тактового импульса.

Одновременно с получением тайм-кода устанавливается сигнал *tick_out* на время одного цикла системной частоты. Значение последнего принятого тайм-кода доступно на шинах *time_out* и *ctrl_out*. Для отправки тайм-кода приложение выставляет данные

на шины *time_in* и *ctrl_in* и дает одиночный импульс на *tick_in*. Исходящий тайм-код хранится в буфере, пока не будет востребован. Рисунок 8, в показывает два входящих тайм-кода (идущих друг за другом) и один исходящий тайм-код. На рисунке 9 изображена диаграмма сигналов в процессе установки соединения между линками *SpaceWire*.

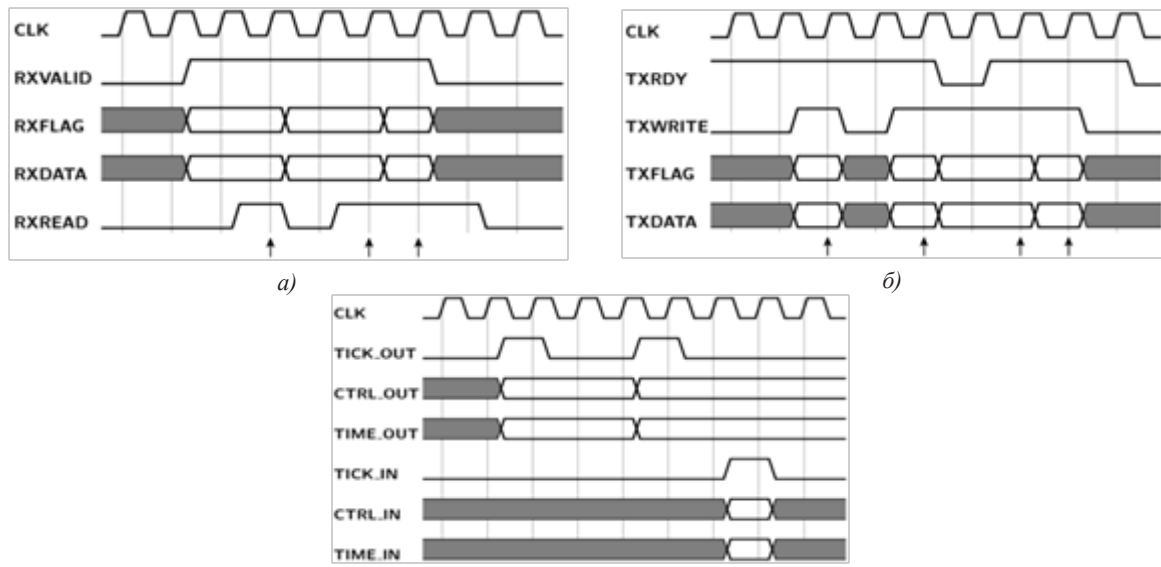


Рисунок 8 – Диаграммы: чтения из приемного FIFO (а); записи в передающее FIFO (б); чтения из FIFO (в)

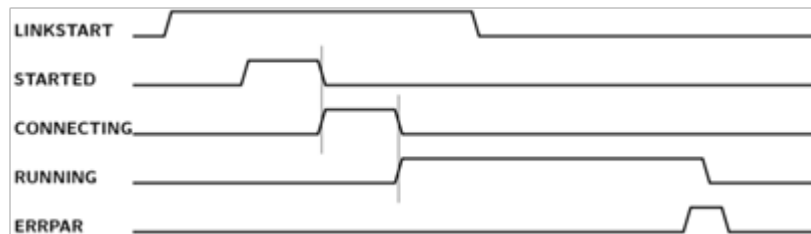


Рисунок 9 – Последовательность установки соединения и сигналы состояния

Обсуждение. Предложен вариант схемы цифрового адаптера для соединения ПЭВМ с аппаратным контроллером *SpaceWire* через *USB*-порт. Для построения устройства использована ПЛИС семейства *Spartan-6*, обладающая высокой производительностью, что делает ее идеальным решением для реализации высокоскоростного интерфейса *SpaceWire*. Временные диаграммы работы устройства, совпадающие с результатами эмуляции на ПЭВМ, подтверждают его эффективность и перспективность практического использования.

Выводы. Разработан цифровой адаптер для подключения к компьютеру через *USB*-порт, включающий аппаратный контроллер *SpaceWire*, который обеспечивает двусторонний обмен информацией по высокоскоростному последовательному каналу, соответствующему стандарту *SpaceWire*. Устройство выполнено с использованием ПЛИС компании *Xilinx XC6SLX4*, монтируемой на многослойную печатную плату. Отправка и получение пакетов с ПЭВМ в адаптере производит-

ся через аппаратный мост *USB-FIFO*. Управление и отладка осуществляется с помощью персонального компьютера, соединенного с устройством по стандарту *USB 2.0*. Разработано текстовое описание проекта ПЛИС на языке *VHDL-1993*.

Потенциальные сферы применения данного адаптера включают размещение коммуникационных сетей *SpaceWire* на космических и авиационных аппаратах, сопряжение микропроцессоров с сетью *SpaceWire*, сопряжение датчиков, модулей памяти, подсистем аппаратной телеметрии с каналами связи *SpaceWire*, обеспечение взаимодействия бортовой аппаратуры, в том числе систем управления, бортовых коммуникаций и ЦОС, радиоэлектронная аппаратура космических аппаратов, аппаратура гидроакустических комплексов и комплексов связи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Sheynin Y.E., Suvorova E.A., Rozhdestvenskaya K.N. Management in perspective distributed onboard computing systems based on *SpaceWire* standard // 2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems

(WECONF 2019). 2019. PP. 8840122.

2. Alexeeva K.I., Kurbanov L.I., Suvorova E.A. Calculation of control codes delays in onboard SpaceWire networks // 2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF 2019). 2019. PP. 8840642.

3. Olenov V.L., Lavrovskaya I.I., Korobkov I.L., Kurbanov L.I., Sheynin Y.E. Algorithms and methods for design and simulation of onboard SpaceWire networks // 2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF 2019). 2019. PP. 8840133.

4. Гришин, В.Ю. Сеть SpaceWire/SpaceFibre как основа глобальной космической инфраструктуры / В.Ю. Гришин, П.М. Еремеев, А.В. Орлов // Наноиндустрия. – 2020. – Т. 13, № S4 (99). – С. 115 – 116.

5. Хульцебош Ю. USB в электронике. 2-е изд. – СПб : БХВ-Петербург, 2011. – 224 с.

6. Тарасов И.Е. Разработка цифровых устройств на основе ПЛИС Xilinx с применением языка VHDL. М.: Горячая линия-Телеком, 2021. – 252 с.

7. Соловьев В.В. Проектирование функциональных блоков встраиваемых систем на FPGA. М.: Горячая линия-Телеком, 2021. – 252 с.

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

9. Строгонов, А.В. Цифровая обработка сигналов в базе программируемых логических интегральных схем: учебное пособие для вузов / А.В. Строгонов. – 4-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 312 с.

10. Ушенина, И.В. Проектирование цифровых устройств на ПЛИС. – 2-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2023. – 408 с.

11. Бибило П.Н. Основы языка VHDL. 7-е изд. – М.: Издательство Ленанд, 2021. – 328 с.

12. Гришин В.Ю., Еремеев П.М., Орлов А.В. Сеть SpaceWire/SpaceFibre как основа глобальной космической инфраструктуры // Наноиндустрия. – 2020. – Т. 13. – № S5-1 – (102). – С. 114-116.

13. Максютин А.С., Казайкин Д.С., Дымов Д.В. Применение аппаратно-программного комплекса автономного тестирования узла SpaceWire для проведения испытаний СБИС контроллера информационно-управляющего интерфейса // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2023. – Т. 10. – № 2. – С. 63-72.

14. Максютин А.С., Мурыгин А.В. Концепция построения стенда для тестирования бортовой аппаратуры SpaceWire с возможностью программного и аппаратного моделирования реконфигурируемой топологии бортовой сети космического аппарата // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. – 2023. – № 2 (145). – С. 4-14.

15. Оленов В.Л., Лавровская И.Я., Коробков И.Л., Шейнин Ю.Е. Проектирование и моделирование бортовых сетей SpaceWire // Научная сессия ГУАП: Сборник докладов. – 2019. – С. 205-214.

16. Сердюков К.А., Василенко С.Ю. Передатчик информации по протоколу SpaceWire // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. – 2023. – № 1-1. – С. 213-215.

17. Горбунов С.Ф., Гришин В.Ю., Еремеев П.М. Сетевые интерфейсы космических аппаратов: перспективы развития и проблемы внедрения // Наноиндустрия. – 2019. – № S (89). – С. 128-130.

18. Синёв Н.И., Карандашев А.А., Оленов В.Л., Чумакова Н.Ю., Сыщиков А.Ю. Аппаратно-программная отработка коммуникационных протоколов для бортовых сетей // Системный анализ и логистика. – 2022. – № 1 (31). – С. 44-62.

19. Оленов В.Л., Шахомиров А.В. Подходы к развитию систем автоматизированного проектирования и моделирования бортовых сетей // Системный анализ и логистика. – 2021. – № 4 (30). – С. 76-86.

20. Наваби, З. Проектирование встраиваемых систем на ПЛИС / З. Наваби ; перевод с английского В. В. Соловьева. – Москва: ДМК Пресс, 2016. – 464 с.

21. Xilinx Spartan-6 – FPGA/ПЛИС - Xilinx [Электронный ресурс]. – URL: <https://inline-ctc.ru/xilinx/spartan-6> (дата обращения: 20.09.2023).

Статья поступила в редакцию 01.10.2023

Статья принята к публикации 15.12.2023

УДК 004.852 + 519.254

EDN: ECNLHE

МЕТОД НЕЙРО-НЕЧЕТКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ФУНКЦИЙ В РЯДЫ ФУРЬЕ И МАКЛОРЕНА

©Автор 2023

ORCID: 0009-0005-3607-775X

МОРОЗОВ Сергей Михайлович, аспирант

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина) (197022, Россия, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, дом 5, литера Ф, email: frostsergei01@gmail.com)

Аннотация. В работе рассматривается метод аппроксимации, основанный на использовании нейро-нечетких вычислений, связанный с разложением функций в ряды Фурье и Маклорена. Классические нейро-нечеткие системы, ориентированные на высокую точность аппроксимации, формируют результат в виде линейной или полиномиальной зависимости от входных переменных, что ограничивает универсальность систем. Существуют решения по использованию нейро-нечетких систем для разложения функций в ряды Фурье и Маклорена, однако такие системы специализированы, и также ограничивают возможности вычислительной системы. Описываются подходы, реализующие разложение функций в ряды Фурье для выполнения аппроксимации и в ряды Маклорена в целях идентификации функций. Производится оценка точности работы нейро-нечеткой системы при аппроксимации периодических зависимостей и при идентификации функций. Разработан метод разложения в ряды Фурье и Маклорена в рамках одной системы. Было установлено, что использование предложенного метода для аппроксимации периодических функций обеспечивает меньшую погрешность, чем классические нейро-нечеткие решения. Предложенный подход также может использоваться для идентификации функций с помощью разложения в ряды Маклорена. Таким образом описанный нейро-нечеткий метод применим для решения задачи аппроксимации периодических функций с высокой точностью и в целях определения вида функций на основе справочных данных.

Ключевые слова: нейро-нечеткие вычисления, аппроксимация функций, идентификация функций, ряды Маклорена, ряды Фурье.

METHOD OF NEURO-FUZZY FOURIER AND MACLAURIN EXPANSION OF FUNCTIONS

© The Authors 2023

MOROZOV Sergey Mikhailovich, post-graduate student

Saint Petersburg Electrotechnical University

(197376, Russia, St. Petersburg, ul. Professora Popova 5, email: frostsergei01@gmail.com)

Abstract. The paper considers an approximation method based on the use of neuro-fuzzy calculations associated with the decomposition of functions into Fourier and Maclaurin series. Classical neuro-fuzzy systems, focused on high accuracy of approximation, form the result in the form of a linear or polynomial dependence on input variables, which limits the universality of the systems. There are solutions for using neuro-fuzzy systems to decompose functions into Fourier and Maclaurin series, but such systems are specialized and also limit the capabilities of the computing system. The approaches implementing the decomposition of functions into Fourier series for approximation and into Maclaurin series for identification of functions are described. The accuracy of the neuro-fuzzy system is evaluated when approximating periodic dependencies and when identifying functions. A method of decomposition into Fourier and Maclaurin series within a single system has been developed. It was found that the use of the proposed method for the approximation of periodic functions provides a smaller error than the use of classical neuro-fuzzy solutions. The use of the proposed approach for decomposition into Maclaurin series can be used to determine the type of functions. Thus, the proposed neuro-fuzzy method can be used to solve the problem of approximating periodic functions with high accuracy and to determine the type of functions based on reference data.

Keywords: neuro-fuzzy computing, function approximation, function identification, Maclaurin series, Fourier series.

Для цитирования: Морозов С.М. Метод нейро-нечеткого разложения функций в ряды Фурье и Маклорена / С.М. Морозов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 12. – № 4(64). – С. 59-63. – EDN: ECNLHE.

Введение. Аппроксимация сложных зависимостей является одной из актуальных задач в измерительных системах реального времени. Для решения этой задачи набирают популярность методы искусственного интеллекта. Чтобы использовать для решения задачи аппроксимации алгоритмы машинного обучения и методы интерпретации систем применяются нейро-нечеткие системы [1].

Основной задачей аппроксимации является построение упрощенной модели существующей зависимости, которая требует меньше ресурсов для хранения и вычислений, однако обеспечивает достаточную точность работы. Нейро-нечеткие системы используются для аппроксимации многомерных зависимостей, однако вид выходных зависимостей ограничен структурой системы: в

общем случае нейро-нечеткие системы являются реализацией систем нечеткого вывода на основе машинного обучения. Следовательно, вид выходных зависимостей нейро-нечетких систем аналогичен таковым в системах нечеткого вывода. Для аппроксимации высокой точности используются системы Такаги-Сугено-Канга (*TSK*-системы) [2,3], которые формируют результат в виде математической зависимости от входных переменных. Кусочно-полиномиальные зависимости, формируемые *TSK*-системами высшего порядка [4,5] могут не обеспечивать точность при аппроксимации определенных зависимостей [6], а формирование рядов применяется для предварительной или последующей обработки результатов [7, 8]. Во многих случаях использование систем высшего порядка не рассматривается, так как увеличение порядка *TSK*-системы увеличивает количество вычислений при том, что увеличение точности аппроксимации не гарантируется [6]. Существуют системы, формирующие ряды Фурье [9], Тейлора [10] и Маклорена [11], однако эти системы являются узко специализированными: указанные системы не способны формировать зависимости, отличные от указанных.

Существующие направления развития нейро-нечетких систем нацелены на формирование нечетких правил [12] и нечетких множеств [13]. Увеличение количества нечетких правил и нечетких множеств будут положительно влиять на точность аппроксимации, так как реализуемые нейро-нечеткими системами методы кусочной аппроксимации [14] будут работать точнее при формировании более оптимальных нечетких множеств. Однако изменение вида выходной зависимости может увеличить точность без увеличения количества нечетких множеств, что является более оптимальным с точки зрения минимизации объема модели, так как рост количества нечетких множеств приводит к большему размеру модели, чем при изменении выходной зависимости.

Целью данной работы является разработка универсального метода разложения функций в ряды Фурье и Маклорена на базе нейро-нечетких вычислений для аппроксимации и идентификации функций. Таким образом создается универсальный подход, который позволит реализовывать различные методы аппроксимации на основе одной модели нейро-нечетких систем.

Методология. Для реализации метода разложения функций в ряды Фурье или Маклорена требуется создать структуру нейро-нечеткой системы, которая может реализовать оба эти метода. Для этого в качестве базы используется система вида *S-ANFIS* [15], которая является обобщением *ANFIS* [16]. Особенностью этой системы является возможность использования различных наборов переменных для формирования нечетких правил и при использовании в нечетком выводе Такаги-

Сугено-Канга. Так, при использовании одинаковых данных *S-ANFIS* работает в режиме *ANFIS*. Следует отметить, что из всех классических методов нейро-нечеткой аппроксимации *ANFIS* демонстрирует наилучшее соотношение точности к размеру модели, поэтому этот вид систем является оптимальным для доработки. Недостатком *ANFIS* по сравнению с другими системами является большое время обучения, однако более быстрые в обучении системы являются менее точными. При программном моделировании используется существующая реализация *S-ANFIS* на фреймворке *PyTorch*.

Метод основан на создании дополнительного набора данных, который будет использоваться при формировании итоговых зависимостей. Исходный набор данных используется для формирования нечетких правил, а дополнительный – для вычислений. Особенностью дополнительного набора данных является то, что данные в нем представляют собой результаты вычисления подфункций, линейная зависимость которых будет сформирована при дефазификации. Как и в *ANFIS*, подбор коэффициентов при этих подфункциях осуществляется методом наименьших квадратов.

Схожий подход использовался в работе [17], в которой встраивание функций осуществлялось на уровне обучения системы нечетким правилам. Отличием представленного метода является то, что часть нейро-нечеткой системы, выполняющей обучение на исходных данных не затрагивается при использовании *S-ANFIS*. Также предложенный метод похож на подход, используемый в работе [18], в которой данные передавались дефазификатору после отдельной нейро-нечеткой обработки.

Реализация метода для формирования рядов Фурье требует формирования для каждого значения входных данных набора синусоидальных и косинусоидальных функций, описанных в ряде Фурье. В зависимости от требуемой точности будет определяться количество слагаемых: каждый дополнительный элемент ряда Фурье требует формирования двух дополнительных слагаемых для каждой переменной.

Для рядов Маклорена требуется формирование классической *TSK*-системы высшего порядка, однако акцент для этого ряда делается не только на увеличение точности аппроксимации, но и на конкретных значениях коэффициентов при формируемых слагаемых. При этом требуется ввести параметр, определяющий допустимое отклонение, которое будет определять равенство конкретного коэффициента указанному в справочных данных. При этом значение свободного члена в этом случае можно использовать для нормализации данных, которая нужна для сверки со справочными данными при линейных преобразованиях над функциями.

В целях описания количества слагаемых аппроксимирующих функций вводится понятие глубины аппроксимации. Это связано с тем, что результирую-

щие функции являются суммой определенных слагаемых, вид которых определен используемым видом аппроксимации. При этом в зависимости от вида функции скорость роста количества слагаемых отличается: дополнительный терм полиномиальной функции состоит из одного слагаемого, в то время как для ряда Фурье используются два. Для того, чтобы описать размер функций без привязки к количеству используемых термов вводится понятие глубины аппроксимации.

Результаты. Для оценки точности аппроксимации представленным методом производится оценка точности при аппроксимации двух видов функций: универсальной и специализированной. Специализированная функция заточена под простую аппроксимацию рядами Фурье, а универсальная может показать схожую точность как при формировании рядов, так и для полиномиальной аппроксимации. Также требуется использовать набор справочных функций для того, чтобы проверить корректность формирования рядов Маклорена.

Для формирования рядов Фурье используются функции:

$$y=3\sin(x_1)+5\cos(3x_2), -\pi < x_1, x_2 \leq \pi$$

$$y=0,047-0,01x_1-(0,001+0,0015x_1)\cos(6\pi x_2), 0 \leq x_1, x_2 \leq 1$$

Результаты аппроксимации первой функции представлены в таблице 1. В качестве основного показателя точности рассматриваются максимальное отклонение и среднеквадратичное отклонение (СКО). Предполагается, что эта функция покажет хорошие результаты для рядов Фурье и плохие для полиномиальной аппроксимации, так как в функции используются только тригонометрические функции, что создает явное разложение в ряд Фурье.

Результаты аппроксимации второй функции представлены в таблице 2. Эта функция использовалась в работе [19] для оценки аппаратного решения для аппроксимации на основе ANFIS. Более предпочтительный метод аппроксимации для этой функции изначально не известен, поэтому сравнение обоих видов зависимостей выявит более точную итоговую функцию.

Таблица 1 – результаты сравнения нейро-нечеткой аппроксимации первой функции

Количество нечетких множеств	Глубина аппроксимации	Максимальное отклонение (полиномы)	Максимальное отклонение (ряды Фурье)	СКО (полиномы)	СКО (ряды Фурье)
2	1	8.0021	2.4069	14.3144	1.6686
2	2	7.6624	0.8894	8.2561	0.0449
2	3	6.6332	0.0310	9.4425	0.000047
2	4	4.1489	0.0457	2.6939	0.0003
3	1	6.7321	0.4873	6.0430	0.0437
3	2	7.1355	1.3464	6.8205	0.0832
3	3	6.2807	0.1564	6.3893	0.0004
3	4	3.1634	0.7646	1.4604	0.0069
4	1	9.1090	0.4917	4.8895	0.0226
4	2	4.1540	0.2006	0.5437	0.0017
4	3	7.3250	0.9456	6.1143	0.0125
4	4	2.3523	0.2876	0.1495	0.0013

Таблица 2 – результаты сравнения нейро-нечеткой аппроксимации второй функции

Количество нечетких множеств	Глубина аппроксимации	Максимальное отклонение (полиномы)	Максимальное отклонение (ряды Фурье)	СКО (полиномы)	СКО (ряды Фурье)
2	1	0.0031	0.0028	1.2916*10 ⁻⁶	9.8184*10 ⁻⁷
2	2	0.0032	0.0020	1.2985*10 ⁻⁶	2.9732*10 ⁻⁷
2	3	0.0023	0.0031	4.4907*10 ⁻⁷	1.0502*10 ⁻⁶
2	4	0.0019	0.0029	2.7174*10 ⁻⁷	1.0259*10 ⁻⁶
3	1	0.0031	0.0028	7.9217*10 ⁻⁷	8.4869*10 ⁻⁷
3	2	0.0028	0.0006	1.0349*10 ⁻⁶	1.4186*10 ⁻⁸
3	3	0.0029	0.0026	1.1655*10 ⁻⁶	7.6354*10 ⁻⁷
3	4	0.0030	0.0012	9.1132*10 ⁻⁷	1.0737*10 ⁻⁷
4	1	0.0033	0.0004	7.4329*10 ⁻⁷	6.1660*10 ⁻⁹
4	2	0.0003	0.0022	3.4198*10 ⁻⁹	2.9485*10 ⁻⁷
4	3	0.0002	0.0004	1.9020*10 ⁻⁹	6.0119*10 ⁻⁹
4	4	0.0018	0.0005	1.9356*10 ⁻⁷	8.3024*10 ⁻⁹

Для проверки рядов Маклорена формируются функции, которые описаны в справочных данных. При совпадении сформированных коэффициентов при слагаемых со справочными данными считается, что функция идентифицирована.

Рассматриваются функции от двух переменных по аналогии с функциями для проверки рядов

Фурье.

Функция для анализа представляет собой сумму двух функций от одной переменной, у которой есть стандартное разложение в ряд Маклорена [20].

$$y=\exp(x_1)+\cos(x_2), -\pi < x_1, x_2 \leq \pi$$

Коэффициенты при термах представлены в таблице 3. Разложение в ряд предполагает форми-

рование полиномиальной функции, поэтому номер коэффициентов соответствует степени терма. Коэффициент при терме степени 0 – свободный член.

Для реально вычисленных значений указывалось среднее значение коэффициентов для всех диапазонов значений нечетких множеств.

Таблица 3 – коэффициенты при термах функций в рядах Маклорена

Номер коэффициента	Вычисленное значение для $\exp(x)$	Справочное значение для $\exp(x)$	Вычисленное значение для $\cos(x)$	Справочное значение для $\cos(x)$
0	0.9778	1	0.9778	1
1	0.9922	1	0.0570	0
2	0.4461	0.5	-0.4441	-0.5
3	0.1670	0.1(6)	0.0490	0
4	0.0770	0.041(6)	0.0238	0.041(6)

Обсуждение. Результаты моделирования показывают, что использование указанного метода для аппроксимации является эффективным с точки зрения обеспечения высокой точности. Так, из таблицы 1 видно, что использование рядов Фурье в среднем обеспечивает меньшее СКО, что свидетельствует о высокой точности метода при аппроксимации определенных зависимостей. Максимальное отклонение при формировании рядов Фурье может быть меньше, чем при формировании полиномов.

Результаты разложения в ряды Маклорена показывают корректность метода идентификации функций. Нейро-нечеткая система подобрала коэффициенты при термах сформированного многочлена, которые близки к справочным данным. Из таблицы 3 видно, что, если отклонение реальных коэффициентов от справочных менее 0.06 можно считать, что полученные коэффициенты совпадают со справочными.

Полученные результаты не противоречат существующим данным, однако преимущество нового подхода заключается в том, что для формирования рядов использовалась одна, универсальная, нейро-нечеткая модель. Этим обоснована научная новизна результата.

Выводы. В результате математического моделирования была выполнена задачи аппроксимации периодических зависимостей и идентификации функций. Сравнение результатов разложения в ряды Фурье с результатами полиномиальной аппроксимации свидетельствует о повышении точности аппроксимации, а полученные при разложении в ряды Маклорена данные свидетельствуют о том, что функции идентифицируются корректно.

Предложенный подход является универсальным для проверки точности различных методов аппроксимации с использованием нейро-нечетких систем. Структура нейро-нечеткой модели не изменялась, так как выбор метода аппроксимации осуществлялся на уровне обработки данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Noureen Talpur, Said Jadid Abdulkadir, Hitham Alhussian, Mohd Hilmi Hasan, Norshakirah Aziz, Alwi Bamhdi Deep Neuro-Fuzzy System application trends, challenges, and future perspectives: a systematic survey. *Artificial Intelligence Review* 56, 865–913 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10462-022-10188-3>
2. T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy identification of

systems and its applications to modeling and control," in *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. SMC-15, no. 1, pp. 116-132, Jan.-Feb. 1985, doi: 10.1109/TSMC.1985.6313399.

3. Zhang P., Shen Q. Dynamic TSK systems supported by fuzzy rule interpolation: An initial investigation //2020 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE). – IEEE, 2020. – С. 1-7.

4. B. Qin, Y. Nojima, H. Ishibuchi and S. Wang, "Realizing Deep High-Order TSK Fuzzy Classifier by Ensembling Interpretable Zero-Order TSK Fuzzy Subclassifiers," in *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 29, no. 11, pp. 3441-3455, Nov. 2021, doi: 10.1109/TFUZZ.2020.3022574.

5. Liu Y., Liu F. An adaptive neuro-complex-fuzzy-inferential modeling mechanism for generating higher-order TSK models // *Neurocomputing*. – 2019. – Т. 365. – С. 94-101.

6. Wiktorowicz, K., Krzeszowski, T. Approximation of two-variable functions using high-order Takagi–Sugeno fuzzy systems, sparse regressions, and metaheuristic optimization. *Soft Computing* 24, 15113–15127 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00500-020-05238-3>

7. A. Das and M. Bhattacharya, "GA Based Neuro Fuzzy Techniques for Breast Cancer Identification," 2008 International Machine Vision and Image Processing Conference, Portrush, Ireland, 2008, pp. 136-141, doi: 10.1109/IMVIP.2008.19.

8. Teodorescu H.N. Taylor and bi-local piecewise approximations with neuro-fuzzy systems // *Studies in Informatics and Control*. – 2012. – Т. 21. – №. 4. – С. 367-376.

9. A.A. Martirosyan, K.V. Martirosyan and A.B. Chernyshev, "Application of Fourier Series in Distributed Control Systems Simulation," 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), Saint Petersburg and Moscow, Russia, 2019, pp. 609-613, doi: 10.1109/EIConRus.2019.8656865.

10. He, JH., Ji, FY. Taylor series solution for Lane–Emden equation. *Journal of Mathematical Chemistry* 57, 1932–1934 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10910-019-01048-7>

11. Marwan Alquran, The amazing fractional Maclaurin series for solving different types of fractional mathematical problems that arise in physics and engineering, *Partial Differential Equations in Applied Mathematics*, Volume 7, 2023, doi: 10.1016/j.pdiff.2023.100506

12. Jeremy Kerr-Wilson, Witold Pedrycz, Generating a hierarchical fuzzy rule-based model, *Fuzzy Sets and Systems*, Volume 381, 2020, Pages 124-139, doi: 10.1016/j.fss.2019.07.013

13. Xiaowei Gu, Qiang Shen, A self-adaptive fuzzy learning system for streaming data prediction, *Information Sciences*, Volume 579, 2021, Pages 623-647, doi: 10.1016/j.ins.2021.08.023

14. Lucian Coroianu, Marek Gagolewski, Przemyslaw Grzegorzewski, Nearest piecewise linear approximation of fuzzy numbers, *Fuzzy Sets and Systems*, Volume 233, 2013, Pages 26-51, doi: 10.1016/j.fss.2013.02.005

15. G. Lenhard and D. Maringer, "State-ANFIS: A Generalized Regime-Switching Model for Financial Modeling," 2022 IEEE Symposium on Computational Intelligence for Financial Engineering and Economics (CIFER), Helsinki, Finland, 2022, pp. 1-8, doi: 10.1109/CIFER52523.2022.9776208.

16. Armaghani, D.J., Asteris, P.G. A comparative study of ANN and ANFIS models for the prediction of cement-based mortar materials compressive strength. *Neural Computing and Applications*, 33, 4501–4532 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00521-020-05244-4>

17. Prometeo Cortés-Antonio, Ildar Batyrshin, Alfonso Martínez-Cruz, Luis A. Villa-Vargas, Marco A. Ramírez-Salinas, Imre Rudas, Oscar Castillo, Herón Molina-Lozano, Learning rules for Sugeno ANFIS with parametric conjunction operations. Applied Soft Computing, Volume 89, 2020, doi: 10.1016/j.asoc.2020.106095.

18. Jhang, J.-Y.; Tang, K.-H.; Huang, C.-K.; Lin, C.-J.; Young, K.-Y. FPGA Implementation of a Functional Neuro-Fuzzy Network for Nonlinear System Control. Electronics 2018, 7, 145. <https://doi.org/10.3390/electronics7080145>

19. Dziwiński P. et al. hardware implementation of a Takagi-Sugeno neuro-fuzzy system optimized by a population algorithm //Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing Research. – 2021. – Т. 11.

20. Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. – Физматгиз, 1963. – Т. 45.

Статья поступила в редакцию 01.11.2023

Статья принята к публикации 15.12.2023

УДК 004.942; 536.22; 614.843

EDN: AGJPHG

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ ОГNETУШАЩЕГО ВЕЩЕСТВА В НАПОРНОМ ПОЖАРНОМ РУКАВЕ

© Авторы 2023

SPIN: 7174-4994

AuthorID: 679668

ORCID: 0009-0004-7043-7379

МАЛЫЙ Виталий Петрович, доктор физико-математических наук, доцент,
профессор кафедры физики, математики и информационных технологий

Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России

(660074, Россия, Красноярский край, Железнодорожск, улица Северная, 1, e-mail: sietmen@yandex.ru)

SPIN: 7824-8120

AuthorID: 501137

ORCID: 0000-0003-1153-350X

ResearcherID: A-7628-2015

ScopusID: 55990913900

ПОЖАРКОВА Ирина Николаевна, кандидат технических наук, доцент,
профессор кафедры инженерно-технических экспертиз и криминалистики

Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России

(660074, Россия, Красноярский край, Железнодорожск, улица Северная, 1, e-mail: pozharkova@mail.ru)

SPIN: 9689-4190

AuthorID: 1147319

ORCID: 0009-0004-9992-1412

КУРТОВ Сергей Олегович, преподаватель кафедры пожарной тактики и аварийно-спасательных работ
Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России

(660074, Россия, Красноярский край, Железнодорожск, улица Северная, 1, e-mail: kurtovsergej1983@yandex.ru)

SPIN: 7464-0092

AuthorID: 14494

ORCID: 0000-0002-4298-2036

ScopusID: 25633904300

БАБЁНЫШЕВ Сергей Валерьевич, кандидат физико-математических наук,
профессор кафедры физики, математики и информационных технологий

Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России

(660074, Россия, Красноярский край, Железнодорожск, улица Северная, 1, e-mail: sergei.babyonyshev@gmail.com)

Аннотация. В статье рассмотрены особенности тепло-гидравлических процессов, которые протекают в напорных пожарных рукавах, заполненных статичной жидкостью. Отмечена актуальность исследования процесса остывания огнетушащего вещества в насосно-рукавной системе для эффективного осуществления боевых действий по тушению пожаров при низких температурах. Описано устройство экспериментальной установки, имитирующей участок рукава, которая позволяет выполнять измерения температуры огнетушащего вещества в различных точках гидростолба и температуры поверхности оболочки. Представлены результаты системного анализа особенностей формирования температурных полей в объеме технической воды, заполняющей напорный пожарный рукав, полученные на основе натурных экспериментов и регрессионного анализа. Приведена графическая интерпретация эмпирически полученных данных. Установлен характер и разработана математическая модель радиально-азимутального распределения температуры воды при её свободном остывании в рукаве с перекрытым стволом. Сделан вывод, что построенные на основе математической модели зависимости качественно согласуются с соответствующими экспериментальными характеристиками. Обосновано применение результатов работы для создания новых образцов пожарной техники и повышения эффективности прокладки рукавных линий в задачах управления развертыванием сил и средств подразделений МЧС России, в том числе, в условиях Крайнего Севера и Арктики.

Ключевые слова: рукав пожарный напорный, насосно-рукавная система, перемерзание тракта подачи воды, огнетушащие вещества, давление, расход, температура, теплопроводность, теплообмен, свободная конвекция, температурное поле, круглоцилиндрический гидростолб.

ANALYSIS OF PROCESSES OCCURRING WITH FREE CONVECTION OF FIRE EXTINGUISHING AGENTS IN PRESSURE FIRE HOSES

© The Authors 2023

MALY Vitaly Petrovich, doctor of physical and mathematical sciences, docent,
professor of the department of physics, mathematics and information technology

Siberian Fire and Rescue Academy of EMERCOM of Russia
(660074, Russia, Zheleznogorsk, Severnaya street, 1, e-mail: sietmen@yandex.ru)

POZHARKOVA Irina Nikolaevna, candidate of technical sciences, docent,
professor of department of technical examinations and criminalistics

Siberian Fire and Rescue Academy of EMERCOM of Russia
(660074, Russia, Zheleznogorsk, Severnaya street, 1, e-mail: pozharkova@mail.ru)

KURTOV Sergei Olegovich, lecturer at the department of fire tactics and rescue operations
Siberian Fire and Rescue Academy of EMERCOM of Russia

(660074, Russia, Zheleznogorsk, Severnaya street, 1, e-mail: kurtovsergej1983@yandex.ru)

BABENYSHEV Sergey Valerievich, candidate of physical and mathematical sciences,
professor of the department of physics, mathematics and information technology

Siberian Fire and Rescue Academy of EMERCOM of Russia
(660074, Russia, Zheleznogorsk, Severnaya street, 1, e-mail: sergei.babyonyshev@gmail.com)

Abstract. The article discusses the features of thermal-hydraulic processes that occur in pressure fire hoses filled with static liquid. The relevance of studying the cooling process of the fire extinguishing agent in the pump-hose system for the effective implementation of combat operations to extinguish fires at low temperatures is noted. The design of an experimental setup is described, simulating a section of a hose, which makes it possible to measure the temperature of the fire extinguishing agent at various points of the hydraulic column and the temperature of the surface of the shell. The results of a system analysis of the features of the formation of temperature fields in the volume of technical water filling a pressure fire hose, obtained on the basis of full-scale experiments and regression analysis are presented. A graphical interpretation of the empirically obtained data is given. The nature and mathematical model of the radial-azimuthal distribution of water temperature during its free cooling in a hose with a blocked trunk has been established. It is concluded that the dependences constructed on the basis of the mathematical model are in qualitative agreement with the corresponding experimental characteristics. The application of the results of the work to create new models of firefighting equipment and increase the efficiency of laying hose lines in the tasks of managing the deployment of forces and means of units of the Ministry of Emergency Situations of Russia, including in the conditions of the Far North and the Arctic, is justified.

Keywords: pressure fire hose, pump-hose system, freezing of the water supply path, fire extinguishing agents, pressure, flow rate, temperature, thermal conductivity, heat transfer, free convection, temperature field, round-cylindrical hydrocolumn.

Для цитирования: Мальный В.П. Анализ процессов протекающих при свободной конвекции огнетушащего вещества в напорном пожарном рукаве / В.П. Мальный, И.Н. Пожаркова, С.О. Куртов, С.В. Бабёнышев // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 12. – № 4(64). – С. 64-71. – EDN: AGJPHG.

Введение. Активное социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации обуславливает необходимость решения вопросов обеспечения комплексной безопасности данного региона, включая организацию пожаротушения на промышленных объектах и в населенных пунктах с учетом низких температур [1]. Обзор научной литературы [2-7] показал, что в настоящее время слабо исследованными остаются процессы, протекающие в рукавах пожарных напорных (РПН), заполненных статичной или движущейся жидкостью (водой, водными растворами с пенообразователями, смачивателями и т.п.).

К таким процессам можно отнести:

- деформацию стенок РПН под давлением;
- изменение гидравлического сопротивления РПН в зависимости от температуры воды, ионного состава, минерализации, концентрации взвешенных веществ, наличия примесей;
- характер движения воды;
- теплообмен с окружающей средой;
- особенности формирования температурных полей внутри пожарного рукава;
- другие процессы.

Следует отметить, что не вполне ясна роль перечисленных процессов в изменении параметров подачи огнетушащих веществ, таких как расход, давление, потери напора, гидравлическое сопротивление, в т.ч. при отрицательных температурах окружающей среды.

Основное внимание отечественными [8-12] и зарубежными [13-20] авторами уделяется анализу гидравлических и теплофизических характеристик ламинарного и турбулентного течения жидкостей, однако недостаточно освещаются вопросы исследования температурных полей в горизонтальных трубах при отсутствии движения воды. Между тем, такая информация представляет интерес в контексте исследования условий и скорости остывания огнетушащего вещества в РПН при осуществлении боевых действий по тушению пожаров в условиях низких температур, приводящих к перемерзанию тракта подачи воды к месту пожара. Понимание процессов, протекающих в пожарных рукавах и рукавном оборудовании при подобных условиях окружающей среды, обуславливает дальнейшее развитие пожарной гидравлики и теплотехники, направленное на совершенствование как технических

средств подачи больших объемов огнетушащих веществ, так и пожарной техники в целом. В частности, полученные в рамках соответствующих исследований результаты могут быть использованы в качестве исходных данных для решения задач управления пожарными роботами при возмущающих воздействиях [21], к которым в том числе относятся низкие температуры.

В данном материале представлены результаты исследования процесса формирования радиально-азимутального распределения температуры (РАРТ) неподвижной воды в РПН при условии теплоотвода в атмосферу. Цель работы заключалась в расчетно-экспериментальном определении формы РАРТ, а также в теоретическом обосновании полученной формы. Одной из основных гипотез исследования, результаты которого представлены в статье, являлось предположение, что отбор тепла в атмосферу при охлаждении воды в РПН происходит изотропно от

оболочки рукава – к окружающему неподвижному воздуху.

В работах [22-25], посвященных исследованиям свободной конвекции в слое жидкости, отмечается отличие результатов, полученных аналитическими и экспериментальными методами, которое в некоторых случаях достигает 50%. Для детального изучения процессов теплообмена при свободном остывании воды в РПН проведены натурные эксперименты [26].

Методология. Опыты проводились на разработанной в Сибирской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России экспериментальной установке (рис. 1), имитирующей участок РПН, заполненного водой. Установка оборудована термодатчиками (в частности – термопарами «хромель-алюмель»), позволяющими выполнять измерения как температуры воды в различных точках гидростолба, так и температуры поверхности оболочки РПН (рис. 2).



Рисунок 1 – Устройство экспериментальной установки для измерения радиально-азимутального распределения температуры воды в рукавах пожарных напорных диаметром 51 мм и 77 мм

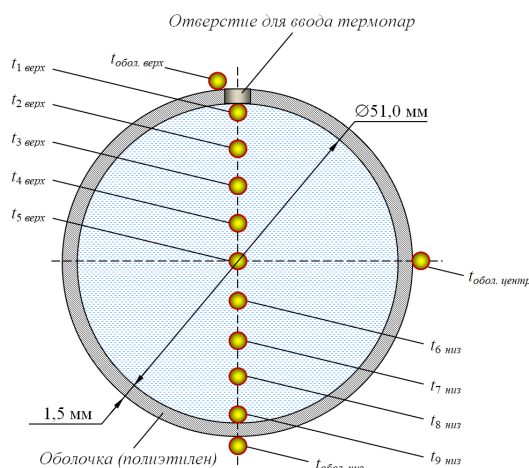


Рисунок 2 – Схема размещения спаев термопар по вертикальному диаметру гидростолба в РПН $\varnothing 51$ мм

Внутренний диаметр D оболочки РПН составляет 51 мм, длина L значительно превышает диаметр, что позволяет на участке измерения не учитывать теплообмен гидростолба с окружающей средой через торцевые поверхности установки (рис. 3).

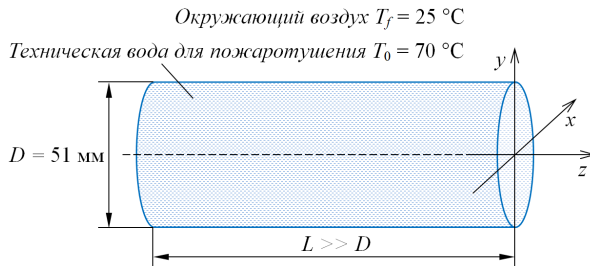


Рисунок 3 – Эскиз графической модели гидростолба

При проведении эксперимента установку наполняли технической водой, применяемой в пожаротушении, с начальной температурой $T_0 = 70^\circ\text{C}$. Температура окружающего воздуха составляла $T_f = 25^\circ\text{C}$. Температуру воды и поверхности оболочки РПН фиксировали термодатчиками (рис. 2) с интервалом 5 мин до момента полного остывания.

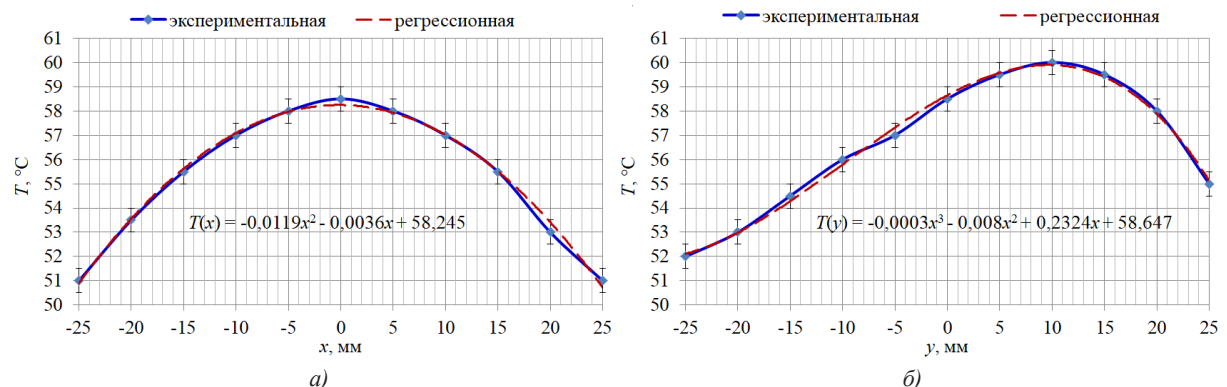


Рисунок 4 – Экспериментально определённые распределения температуры воды в поперечном сечении РПН $\varnothing 51$ мм на 40 минуте остывания: а – горизонтальное сечение гидростолба; б – вертикальное сечение гидростолба

Параболический вид горизонтальной эпюры температуры $T(x)$ соответствует решению классического уравнения теплопроводности для свободного охлаждения (дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье при отсутствии внутренних источников теплоты) [27]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c_p \times \rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = a \times \nabla^2 T, \quad (1)$$

где τ – время, с;
 λ – коэффициент теплопроводности воды, Вт/(м·К);

c_p – удельная массовая изобарная теплоемкость воды, Дж/(кг·К);

ρ – плотность воды, кг/м³;

$a = \frac{\lambda}{c_p \times \rho}$ – коэффициент температуропроводности воды, м²/с.

Уравнение (1) с использованием метода разделения переменных преобразуется к уравнению Бесселя, для которого при известных начальных и граничных

Результаты. На основании полученных экспериментальных данных построены (рис. 4) распределения температуры воды T по горизонтальному (а) и вертикальному (б) диаметру гидростолба в РПН, а также регрессионные модели этих распределений.

Распределение температуры воды в горизонтальном сечении РПН (рис. 4а) имеет выраженную симметрию относительно вертикальной оси с максимумом температуры, составляющим $58,5^\circ\text{C}$, вблизи геометрического центра гидростолба. Разница температур в центре гидростолба и на его боковой поверхности (по горизонтальному диаметру) составляет $\Delta T_{exp} = 58,5 - 51,0 = 7,5^\circ\text{C}$.

Для теоретического обоснования экспериментально полученной зависимости (рис. 4а) выполнен расчет температур свободного конвективно-лучистого остывания точек крутлоцилиндрического гидростолба, соответствующего условиям натурального эксперимента. С целью упрощения расчетов рассматривается только процесс теплоотдачи от воды к воздуху, т.е. на данном этапе исследований принято допущение о нулевом термическом сопротивлении теплопроводности оболочки РПН.

условиях могут быть получены компактные решения, описывающие динамику охлаждения точек гидростолба в виде функции от табулированных собственных чисел ε_n и числа Фурье Fo , в виде [27]:

$$\Theta = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot J_1(\varepsilon_n)}{\varepsilon_n (J_0^2(\varepsilon_n) + J_1^2(\varepsilon_n))} J_0(\varepsilon_n X) \exp(-\varepsilon_n^2 \cdot Fo), \quad (2)$$

где Θ – относительная безразмерная температура при граничных условиях 3 рода;

J_0 – функция Бесселя 1 рода нулевого порядка;

J_1 – функция Бесселя 1 рода первого порядка;

ε_n – n -й корень характеристического уравнения

$$\frac{\varepsilon}{Bi} = \frac{J_0(\varepsilon)}{J_1(\varepsilon)},$$

$Bi = \frac{\alpha^{\tau} R}{\lambda}$ – число Био (безразмерная конвективно-лучистая теплоотдача, определяющая форму эпюры распределений температуры);

$\alpha^{\tau} = \alpha_c + \alpha_r$ – коэффициент теплоотдачи от поверхности за счет конвективного теплообмена (α_c) и излучения (α_r), Вт/(м²·К);

R – радиус гидростолба (в рассматриваемом случае – половина внутреннего диаметра РПН), м;

X – безразмерная радиальная координата произвольной точки гидростолба, $0 \leq X \leq 1$;

$$Fo = \frac{a\tau}{R^2} - \text{число Фурье.}$$

При $Fo \geq 0,25$ относительная безразмерная температура Θ с высокой точностью может быть представлена первым членом ряда (2) [27]. Значение Θ при граничных условиях третьего рода связано с температурой гидростолба в отдельных точках и окружающей среды следующим соотношением [27]:

$$\Theta = \frac{T - T_f}{T_0 - T_f}, \quad (3)$$

где T – температура точки гидростолба, °С;

T_f – температура воздуха, °С;

T_0 – начальная температура гидростолба, °С.

В таблице 1 приведены соответствующие условиям проведения натурального эксперимента значения расчетных величин, использованных для определения согласно (2)–(3) температур центральной (T_{cent}) и периферийной (расположенной на поверхности) (T_{per}) точек гидростолба в момент времени $\tau = 40$ мин (рис. 5).

Для расчета коэффициента теплоотдачи от поверхности α^{Σ} использован математический аппарат, описанный в работе [27].

Таблица 1 – Расчет температуры центральной (T_{cent}) и периферийной (T_{per}) точки круглоцилиндрического гидростолба для регулярного режима теплопроводности при свободном конвективно-лучистом остывании

Обозначения величин	Значения величин
τ	40 мин = 2400 с
R	51 мм / 2 = 25,5 мм = 0,0255 м
T_0	70 °С
T_f	25 °С
λ	0,668 Вт/(м·К)
a	$1,632 \cdot 10^{-7}$ м ² /с
α_c	6,172 Вт/(м ² ·К)
α_r	7,128 Вт/(м ² ·К)
α^{Σ}	13,300 Вт/(м ² ·К)
Bi	0,508
ε_1	0,947
J_0	0,788
J_1	0,422
Fo	0,602
Θ_{cent}	0,665
Θ_{per}	0,517
T_{cent}	54,3 °С
T_{per}	48,3 °С
$\Delta T_{ev} = T_{cent} - T_{per}$	6,0 °С

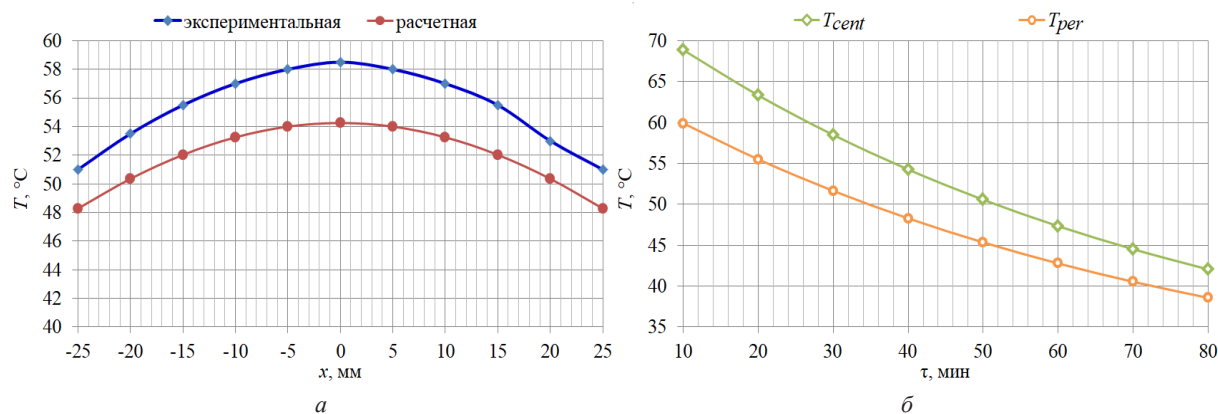


Рисунок 5 – Графики расчетных и экспериментальных зависимостей температуры свободного конвективно-лучистого остывания точек круглоцилиндрического гидростолба $\varnothing 51$ мм:

a – распределение температуры воды в горизонтальном сечении на 40 минуте остывания;

b – временные графики расчетных температур центральной и периферийной точек

Обсуждение. Зависимости, построенные на основе теоретической модели (2)–(3), качественно согласуются с соответствующими экспериментальными характеристиками (рис. 5), однако абсолютные значения температур точек гидростолба отличаются. Так, на 40-й минуте разность температур ΔT_{exp} в центре гидростолба и на его поверхности, определенная по эмпирическим данным, на $1,5^\circ\text{C}$ выше полученной аналитически ΔT_{ev} (рис. 5а), абсолютная среднеквадратическая ошибка по всем точкам измерения составляет $\approx 3,5^\circ\text{C}$. Это свидетельствует о необходимости учета особенностей гидродинамики в пограничном слое воды у внутренней поверхности цилиндрической оболочки РПН и ее теплового сопротивления. Последний параметр в известных работах оценивается приблизительно, что обуславливает актуальность экспериментального измерения теплового сопротивления оболочек РПН, выполненных из различных материалов, в т.ч. многослойных. Кроме того, значение коэффициента теплоотдачи от поверхности α ,

обусловленное излучением, должно в дальнейшем быть скорректировано в зависимости от степени черноты материала РПН.

Распределение температуры остывающей в РПН воды в вертикальном сечении гидростолба $T(y)$ (рис. 4б), полученное в результате эксперимента, отличается несимметричностью со смещенным вверх примерно на треть радиуса максимумом температуры, равным 60°C . Визуализация температурных полей, построенная с использованием регрессионных моделей (рис. 4) в *Python* (а) и *MathCad* (б), представлена на рисунке 6. По оси абсцисс (ординат) отложены координаты точек поперечного сечения гидростолба по горизонтали (вертикали), относительно его геометрического центра, а по оси аппликат – соответствующие им значения температур. Цвет и высота поверхности отображают температуру точки с соответствующими координатами. Графическая интерпретация эмпирических данных (рис. 6) включает трехмерные графики и фазовые карты (изотермы).

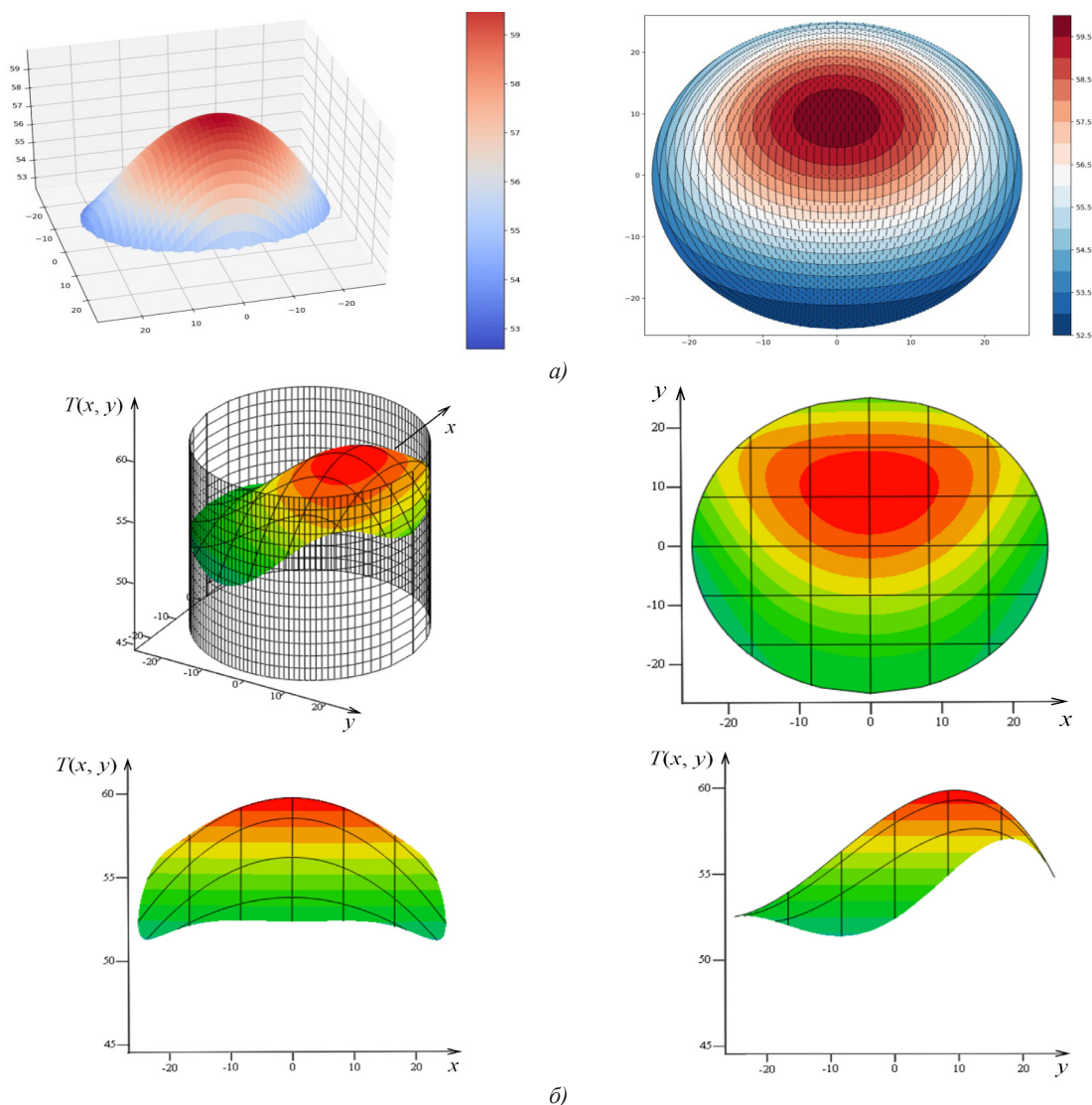


Рисунок 6 – Азимутально-радиальные распределения температуры воды $T(x,y)$ в РПН $\varnothing 51$ мм:
а – построенные в *Python*; б – построенные в *MathCad*

Отклонение точки *PAPT* с максимальной температурой от геометрического центра гидростолба в исследованном диапазоне температур (рис. 4б, рис. 6) объясняется конвекционными процессами под действием гравитационных сил. В процессе теплообмена при остывании воды в РПН возникает разность плотностей жидкости (рис. 7) [28-29], вследствие чего под действием архимедовой силы менее плотные (легкие) слои воды всплывают вверх, в более плотные (тяжелые) – опускаются в нижнюю часть рукава.

Следует отметить, что параболичность зависимости плотности воды от её температуры (рис. 7) может играть особенно важную роль в формировании *PAPT* в процессе охлаждения воды в РПН в области низких ($+4^{\circ}\text{C} \div 0^{\circ}\text{C}$) температур. В частности, если нижний слой воды имеет температуру $+4^{\circ}\text{C}$, а верхний 0°C , то плотности

соответствующих слоев равны, и конвекция будет отсутствовать [27]. Полученные в работе [26] расчетно-экспериментальные характеристики и особенность изменения плотности воды в диапазоне ($+70^{\circ}\text{C} \div +4^{\circ}\text{C} \div 0^{\circ}\text{C}$) позволяют сделать вывод, что в отличие от зависимостей, представленных на рисунках 4 и 6, при замерзании рукава в отсутствие движения воды обледенение внутренней поверхности стенки РПН начнется с верхней части его поперечного сечения, в которой нулевая температура будет достигнута раньше, чем в нижних слоях, в которых имеет место максимальная плотность и температура. Предварительные эксперименты полностью подтвердили эту гипотезу. Следовательно, разработка инженерно-технических решений по тепловой защите внутренней полости РПН должна производиться с учетом зафиксированного явления.

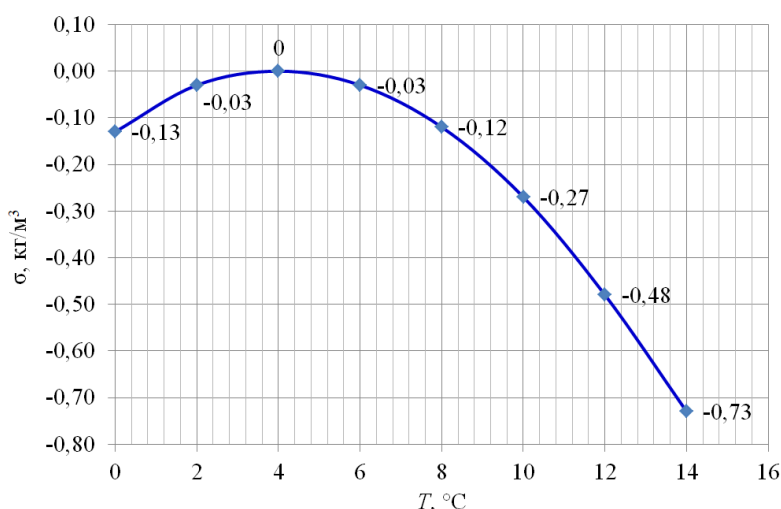


Рисунок 7 – Фрагмент зависимости отрицательной условной плотности σ воды от ее температуры T [28]

Помимо температуры на плотность воды оказывают влияние концентрация взвешенных частиц (мутность), растворённых солей (минерализация), электропроводность [30]. Данные параметры, несомненно, будут оказывать влияние на теплообмен в РПН в зависимости от свойств конкретного используемого для пожаротушения огнетушащего вещества, в т.ч. воды со смачивателями, загустителями, водными растворами солей.

Выводы. Полученные результаты могут быть использованы для уточнения существующей методики расчета параметров замерзания воды в РПН. Отклонение опытных данных от теоретической модели свидетельствует о предпочтительности использования при таких расчетах эмпирических зависимостей, обобщающих данные натуральных экспериментов. Азимутально-радиальные распределения температуры жидкости, определяемые с использованием предложенной установки (рис. 1) при низких температурах окружающей среды, представляют интерес с точки зрения совершенствования тактики ведения боевых действий

по тушению пожаров в арктических условиях, а именно, позволяют прогнозировать момент и место начала обледенения внутренней поверхности РПН и своевременно предпринять меры по предотвращению его как частичного, так и полного замерзания. Вместе с тем, подобная информация может применяться при разработке новых образцов пожарных рукавов и ствольной техники, предназначенных для эксплуатации в условиях низких температур.

Представленные в рамках данного материала результаты были получены для статичного гидростолба. При этом значительный интерес представляет исследование процессов, протекающих в рукавных системах под воздействием низких температур при транспортировании огнетушащего вещества, в том числе с учетом его физико-химических свойств, фазовых переходов, сложной геометрии пожарных рукавов (изгибы, деформация) и т.д. Учитывая многообразие сценариев, которые определяются совокупностью различных факторов, оказывающих существенное влияние на указанные

процессы, оценка соответствующих параметров требует значительного увеличения сложности экспериментальной установки и ресурсоемкости натурных испытаний. Для решения данной проблемы целесообразно использовать математическое моделирование на основе методов вычислительной гидродинамики [31] при проведении предварительных исследований с последующей валидацией полученных на ограниченном наборе сценариев результатов. В частности, моделирование потоковых процессов, возникающих при естественной конвекции в жидкости, может быть выполнено на основе уравнений [32], которые позволяют с высокой относительно натурального эксперимента точностью оценивать изменение основных параметров гидростолба при его остывании за счет теплообмена с окружающей средой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Исследование формирования температурного поля при свободном остывании воды в пожарных рукавах / В.П. Мальный, И.Н. Пожаркова, О.С. Малютин [и др.] // Енисейская теплофизика: Тезисы докладов I Всероссийской научной конференции с международным участием, Красноярск, 28-31 марта 2023 года / Отв. за выпуск Д.В. Платонов. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2023. – С. 181-183.
2. Абросимов Ю.Г., Бинь Х.З. Влияние режимных параметров на гидравлическое сопротивление напорных пожарных рукавов // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2010. – № 2. – С. 78-85.
3. Алешков М.В., Двоенко О.В. Создание пожарной и аварийно-спасательной техники для работы в экстремальных метеорологических условиях // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2011. – № 4. – С. 4-10.
4. Исследование гидравлических характеристик рукавных систем с пропускной способностью более 100 л/с / И.А. Ольховский, О.В. Двоенко, М.В. Алешков, Е.А. Синельникова // Пожарная безопасность. – 2015. – № 4. – С. 124-129.
5. Патент на полезную модель № 135520 U1 Российской Федерации, МПК А62С 37/00. Испытательно-измерительный комплекс: № 2013127198/12: заявл. 17.06.2013; опублик. 20.12.2013 / М.В. Алешков, О.В. Двоенко.
6. Храмов С.П. Измерительный комплекс для исследования работы пожарно-технического оборудования при подаче температурно-активированной воды // Автомобильная промышленность. – 2008. – № 7. – С. 34-36.
7. Яковчук В.И. Гидравлические сопротивления гибких трубопроводов противопожарного водоснабжения. Автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.26.04 / Яковчук Виктор Иванович, Минск, 2000. – 23 с.
8. Кишкин А.А., Краев М.В., Зуев А.А. Интенсификация теплообмена // Сибирский аэрокосмический журнал. – 2005. – № 3. – С. 130-134.
9. Валуева Е.П. Гидродинамика и теплообмен при пульсирующем турбулентном течении в трубе жидкости с переменными свойствами // Теплофизика высоких температур. – 2005. – Т. 43. – № 6. – С. 888-896.
10. Мадьшев И.Н., Санников И.В. Сравнение различных методов интенсификации конвективного теплообмена в трубах при турбулентном течении жидкости // Вестник технологического университета. – 2021. – Т. 24. – № 3. – С. 71-75.
11. Казанцева Н.С., Зиннатуллин Н.Х. Конвективный теплообмен в круглой трубе // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17. – № 3. – С. 77-80.
12. Деменок С.Л. Теплообмен и гидравлическое сопротивление в трубах и каналах. – СПб.: Н-Пром Бюро, СПб. 2012. – 304 с.
13. Touahri S., Boufendi T. Numerical study of the conjugate heat transfer in a horizontal pipe heated by Joulean effect // Thermal science. – 2012. – Т. 16. – № 1. – С. 53-67.
14. Kim D., Ghajar A.J. Heat transfer measurements and correlations for air–water flow of different flow patterns in a horizontal pipe // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2002. – Т. 25. – № 8. – С. 659-676.
15. Kim J., Ghajar A.J. A general heat transfer correlation for non-boiling gas–liquid flow with different flow patterns in horizontal pipes // International Journal of Multiphase Flow. – 2006. – Т. 32. – № 4. – С. 447-465.
16. Chen X. et al. Flow and mixed convection heat transfer of Hitec salt in multi-sided heating pipes // Sustainable Energy Technologies and Assessments. – 2021. – Т. 47. – С. 101375.
17. Ayed H. et al. Experimental investigation on the thermo-hydraulic performance of air–water two-phase flow inside a horizontal circumferentially corrugated tube // Alexandria Engineering Journal. – 2022. – Т. 61. – № 9. – С. 6769-6783.
18. Pourahmad S. et al. Experimental study of heat transfer and pressure drop analysis of the air/water two-phase flow in a double tube heat exchanger equipped with dual twisted tape turbulator: Simultaneous usage of active and passive methods // Journal of Energy Storage. – 2021. – Т. 44. – С. 103408.
19. Subramanian R. et al. Experimental analyses on heat transfer performance of TiO₂-water nanofluid in double-pipe counter-flow heat exchanger for various flow regimes // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2020. – Т. 140. – С. 603-612.
20. Jouhara H. et al. Experimental and theoretical investigation of the performance of an air to water multi-pass heat pipe-based heat exchanger // Energy. – 2021. – Т. 219. – С. 119624.
21. Пожаркова И.Н., Цариченко С.Г., Немчинов С.Г. Моделирование траектории струи огнетушащего средства из пожарного лафетного ствола при возмущающих воздействиях // Безопасность труда в промышленности. – 2022. – № 11. – С. 7-13.
22. Селиванов Н.В., Андрич К.Б., Селиванова О.Н. Теплообмен у ограждающих поверхностей горизонтальной цилиндрической емкости // VI Минский международный форум по теплообмену: тез. докл. и сообщ., Минск, 19-23 мая 2019 г. – 11 с.
23. Манухин Б.Г. и др. Оптическая диагностика процесса свободной конвекции жидкости // Оптика и спектроскопия. – 2015. – Т. 119. – № 3. – С. 418-423.
24. Большов Л.А., Кондратенко П.С., Стрижов В.Ф. Свободная конвекция тепловыделяющей жидкости // Успехи физических наук. – 2001. – Т. 171. – № 10. – С. 1051-1070.
25. Бахтизин Р.Н., Бакиев А.В., Хазиев Н.Н. Исследование процесса теплообмена при свободной конвекции в неоднородных средах // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. – 2014. – Т. 19. – № 4. – С. 44-49.
26. Исследование тепло-гидравлических параметров элементов тракта подачи огнетушащих веществ к месту тушения пожара: отчет о НИР (заключительный): ФГБОУ ВО Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России. – Железногорск, 2022. – 133 с. – № НИОКТР 122031000248-9.
27. Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А. Теплообмен. – М.: Издательство МЭИ, 2005. – 550 с.
28. Tanaka M., Girard G., Davis R., Peuto A., Bignell N. Recommended table for the density of water between 0 °C and 40 °C based on recent experimental reports // Metrologia. – 2001. – Т. 38. – № 4. – С. 301.
29. Nezbeda I., Klajmon M., Hrubý J. Thermodynamic properties of water from SAFT and CPA equations of state: A comprehensive assessment // Journal of Molecular Liquids. – 2022. – Т. 362. – С. 119769.
30. Воробьев А.Е., Чекушина Т.В., Чекушина Е.В., Роман А.Т. Физико-химические свойства вод и их природное образование // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. – 2013. – № 2. – С. 106-112.
31. Zhou M. et al. CFD-DEM analysis of hydraulic conveying bends: Interaction between pipe orientation and flow regime // Powder Technology. – 2021. – Т. 392. – С. 619-631.
32. Пожаркова А.О. Моделирование потоковых процессов, возникающих при естественной конвекции в жидкости // Modern Science. – 2022. – № 5-4. – С. 301-308.

Статья поступила в редакцию 03.09.2023

Статья принята к публикации 15.12.2023

УДК 04.65

EDN: ENPВЕО

БИОИНСПИРИРОВАННЫЕ СТРАТЕГИИ ОРГАНИЗАЦИИ РАСТУЩИХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ БАЗ ДАННЫХ

© Автор(ы) 2023

SPIN: 4241-0712

AuthorID: 348503

ORCID: 0009-0008-5775-4301

ResearcherID: Y-8353-2018

ScopusID: 56816925900

КОЛЬЧУГИНА Елена Анатольевна, доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры «Математическое обеспечение и применение ЭВМ»
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, Пенза, улица. Красная, 40, e-mail: kea_sci@list.ru)

SPIN: 9542-1123

AuthorID: 617488

ORCID: 0000-0002-9555-9848

ResearcherID: GRR-8965-2022

КОЗЛОВ Андрей Юрьевич, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Математическое обеспечение и применение ЭВМ»
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, Пенза, улица. Красная, 40, e-mail: pm@pnzgu.ru)

SPIN: 6671-0510

AuthorID: 549977

ORCID: 0000-0003-1080-4726

ЗИНКИН Сергей Александрович, доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры «Вычислительная техника»
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, Пенза, улица. Красная, 40, e-mail: zsa49@yandex.ru)

Аннотация. Актуальность и цели: объектом исследования являются принципы организации распределенных систем баз данных, реализующих темпоральные модели данных. Предметом исследования являются биоинспирированные стратегии и методы организации распределения данных по сети с виртуальной топологией типа решетки. Целью исследования является разработка стратегий и методов, обеспечивающих эволюционное развитие и рост больших распределенных растущих совокупностей данных посредством самоорганизации и самоупорядочения. Материалы и методы: использованы методы теории клеточных автоматов, теории самоорганизованной критичности, системы уравнений типа Лотка-Вольтерра. Предлагается рассматривать процесс роста распределенных баз данных как процесс типа «реакция-диффузия», что позволяет применить для его исследования уравнение Фишера-Колмогорова-Петровского-Пискунова. Результаты: Выявлены типы процессов самоорганизации, присущие различным биоинспирированным стратегиям организации растущих распределенных баз данных. Определены свойства динамики растущих распределенных баз данных, которые могут быть исследованы и предсказаны с помощью использованных моделей и методов. Выводы: применение модели Фишера-Колмогорова-Петровского-Пискунова позволяет изучать глобальную динамику роста и распространения баз данных в виртуальном пространстве вычислительных сетей. В перспективе это позволяет исследовать взаимодействие нескольких таких баз данных, совместно использующих общее виртуальное пространство вычислительных узлов.

Ключевые слова: темпоральные базы данных, растущие распределенные базы данных, большие данные, самоорганизация, самоупорядочение, модель Фишера-Колмогорова-Петровского-Пискунова.

THE BIO-INSPIRED STRATEGIES FOR ORGANIZING GROWING DISTRIBUTED DATABASES

© The Author(s) 2023

KOL'CHUGINA Elena Anatolyevna, doctor of engineering sciences, associate professor,
professor of the department of «Mathematical Support and Computer Application»
Penza State University

(440026, Russia, Penza, street Krasnaya, 40, e-mail: kea_sci@list.ru)

KOZLOV Andrey Yur'evich, doctor of engineering sciences, professor,
head of the department of «Mathematical Support and Computer Application»
Penza State University

(440026, Russia, Penza, street Krasnaya, 40, e-mail: pm@pnzgu.ru)

ZINKIN Sergey Aleksandrovich, doctor of engineering sciences, associate professor,

professor of the department of «Computer Engineering»
Penza State University

(440026, Russia, Penza, street Krasnaya, 40, e-mail: zsa49@yandex.ru)

Abstract. Background. The object of the study is the organization principles of distributed database systems implementing temporal data models. The subject of the research is bio-inspired strategies and methods for organizing data distribution over a network with a virtual topology of the lattice type. The purpose of the study is to design strategies and methods that ensure the evolutionary development and growth of large distributed growing data sets through self-organization and self-ordering. Materials and methods. The methods of the theory of cellular automata, self-organized criticality, a system of equations of the Lotka-Volterra type are used. It is proposed to consider the process of growth of distributed databases as a “reaction-diffusion” type process, which makes it possible to apply the Fisher-Kolmogorov-Petrovsky-Piskunov equation for its study. Results. The types of self-organization processes inherent in various bio-inspired strategies for organizing growing distributed databases are revealed. The properties of the dynamics of growing distributed databases are determined, which can be investigated and predicted using the models and methods used. Conclusions. The application of the Fisher-Kolmogorov-Petrovsky-Piskunov model makes it possible to study the global dynamics of the databases growth and distribution in the virtual space of the networks. In the perspective, it allows to investigate the interaction of several such databases sharing the common virtual space of computing nodes.

Keywords: temporal databases, growing distributed databases, Big Data, self-organization, self-ordering, Fisher-Kolmogorov-Petrovsky-Piskunov model.

Для цитирования: Кольчугина Е.А. Биоинспирированные стратегии организации растущих распределенных баз данных / Е.А. Кольчугина, А.Ю. Козлов, С.А. Зинкин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 12. – № 4(64). – С. 72-79. – EDN: EHPBEO.

Введение. В условиях современного мира обработка информации практически всегда связана с использованием вычислительных сетей. Одним из типичных применений информационно-вычислительных сетей является организация распределенных баз данных для различных приложений. Специфика этих приложений зачастую требует применения аналитических средств, в том числе из арсенала технологий больших данных (*BigData*) [1], и методов искусственного интеллекта для исследования поведения объектов предметной области в прошлом и предсказания его в будущем.

Подобного рода исследования требуют исходного материала в виде больших объемов данных, фиксирующих смену состояний объектов исследования во времени. В ряде случаев требуется хранить данные за весь срок существования исследуемых объектов.

Это соответствует концепции темпоральных баз данных [2]. Темпоральные базы данных отражают существование объектов предметной области во времени через фиксацию смены их состояний. При этом данные о состоянии объектов сопровождаются одним или несколькими значениями временных (темпоральных) атрибутов, отражающих моменты или периоды времени, в течение которых данные допустимо считать актуальными.

Такой подход изменяет представление об актуализации баз данных: актуализация означает не удаление или изменение данных, переставших быть релевантными, а добавление новых данных. В результате объем информации, хранимой в базах данных, построенных в соответствии с подобной концепцией, неограниченно возрастает. Эта специфика влечет необходимость выработки особых, отличных от традиционных

подходов к организации, хранению и обработке информации, представленной в таких базах данных. Очень желательным было бы наличие у растущих распределенных совокупностей данных способностей к самоупорядочению и самоорганизации, причем эти способности должны быть имплицитно, внутренне присущи данным совокупностям и обуславливаться применяемыми концепциями и стратегиями их построения.

В настоящей статье рассматриваются стратегии и методы, основанные на биоинспирированных концепциях, представляющих комплексы баз данных и обрабатывающих их программ как экосистемы, состоящие из взаимосвязанных компонентов. Рассматриваются стратегии размещения локальных фрагментов распределенных баз данных по отдельным вычислительным узлам сети с топологией решетчатого графа. Стратегии исходят из представления о топологии сети как двумерной клеточной, хотя результаты могут использоваться как для одномерной топологии, так и для топологий с более высокими размерностями, при условии рассмотрения таких топологий как совокупностей двумерных слоев.

Каждая из рассмотренных далее стратегий исходит из того, что базы данных имеют тенденцию увеличиваться в объеме, распространяя свои фрагменты на все большее количество узлов, и рост базы данных происходит в ячейки, смежные с уже занятыми данными.

Динамика роста таких систем требует исследования, что и выполняется в данной статье с использованием различных математических методов.

Теория клеточных автоматов [3] является одной из самых ранних теорий, описывающих как вычисления и вычислители вообще, так и высокопроизводительные параллельные и распределенные вы-

числения в частности. Применительно к тематике данной статьи, теория клеточных автоматов помогает наглядно описать динамику и эволюцию развития растущих баз данных, распределенных по узлам сети. Узлы интерпретируются как клетки или ячейки в некоторой регулярной решетчатой топологии.

В работах [4,5] было предложено отображать распределение баз данных и их фрагментов по узлам вычислительной сети, имеющей логическую топологию решетки, через состояния ячеек клеточного пространства модели. Предложенный в [4,5] метод организации распределенной базы данных исходит из того, что ячейка клеточного пространства может находиться в одном из заданных состояний, переключаясь в процессе своего функционирования между ними. Эти состояния следующие:

- ячейка свободна, то есть не содержит файлы баз данных;
- ячейка содержит файлы базы данных, которые могут быть пополнены новыми данными (фаза роста);
- ячейка содержит файлы баз данных, которые не могут быть более пополнены; локальная копия СУБД осуществляет управление СУБД и базами данных смежных ячеек, перенаправляя поступающую информацию им (фаза управления);
- ячейка освобождается, а хранившиеся в ней фрагменты баз данных переносятся в архив на внешние носители.

Этот метод из [4,5] мы будем рассматривать далее в качестве базового.

При использовании такого метода в виртуальном пространстве вычислительных узлов с течением времени образуются локально сконцентрированные и постоянно увеличивающиеся в объеме совокупности баз данных. Эти совокупности можно уподобить растениям-продуцентам в составе экосистем.

Поддержание и обслуживание таких баз данных, с учетом фактора их распределенности, может быть реализовано коллективом программных агентов [6], обладающих мобильностью и перемещающихся между вычислительными узлами в соответствии с заданными правилами и алгоритмами. В качестве таких алгоритмов могут использоваться, например, «муравьиные» алгоритмы [7,8], алгоритм *vant* [9], спиральная схема движения [10]. В данном контексте имеются в виду программные агенты, созданные в соответствии с классическими агент-ориентированными технологиями, например, реализуемыми в языке *Java*.

Другая группа методов, позволяющих организовать растущие распределенные совокупности данных, поддерживать их целостность и извлекать из них необходимые сведения, связана с использованием методов теории нумераций [11-13] и неравновесного программирования [14].

Так же, как и в случае использования классических методов агент-ориентированного прог-

раммирования, деятельность по поддержанию растущих распределенных совокупностей баз данных осуществляется коллективом активных агентов, рассматриваемых как цифровые организмы [15]. Цифровые организмы представляют собой динамические изменяющиеся совокупности фрагментов программного кода и параметров состояния. Состав таких совокупностей задается описательной структурой, называемой цифровой ДНК.

И сама цифровая ДНК, фактически кодирующая данные и программный код цифрового организма, и кодируемые ею фрагменты кода и данных, могут храниться в файлах баз данных, также удовлетворяющих концепции темпоральных баз данных и являющихся пространственно распределенными. При необходимости те или иные цифровые организмы, либо их наиболее интересные и полезные версии могут актуализироваться, восстанавливаясь по содержимому таких баз данных.

Однако цифровые организмы, восстановленные на основе записей из баз данных, могут участвовать в решении задач администрирования этих же баз данных. Таким образом, понятия программного комплекса и распределенной базы данных оказываются тесно связанными и даже взаимно двойственными.

Описанный принцип структурной организации цифрового организма позволяет сделать его состав переменным, подверженным эволюционным изменениям во времени. Поскольку, в соответствии с парадигмой неравновесного программирования, программная система представляет собой коллектив цифровых организмов, то появляется возможность решения задач с помощью коллектива программных агентов, действующего в условиях распределенной среды и адаптирующегося как к изменяющимся условиям внутри самой среды, так и к изменению потоков задач и требований к решению этих задач.

Появляется также возможность решения принципиально новых задач, не характерных для классических мультиагентных систем. Например, это выполнение расширенных запросов, предложенных в [16], где информационный поиск производится не по одной указанной таблице, а по всем тем таблицам базы данных, которые могут содержать записи с заданными значениями атрибутов. Такие возможности достигаются благодаря совместному применению принципов неравновесного программирования и домено-ориентированного подхода, также основанного на теории нумераций [13].

Адаптивность сообществ цифровых организмов, реализующих концепцию неравновесного программирования, их непрерывно эволюционирующий характер, чувствительность к изменению условий среды функционирования делают важным исследование методов пространственного распределения данных, так как в сущности эти методы управляют функционированием всей распределенной программно-информационной системы. Если расс-

матривать распределенную программно-информационную систему как аналог экосистемы (биоценоза), то распределенные структуры данных играют роль аналогов растений-продуцентов, от наличия которых зависит существование программных агентов-консументов. Взаимодействия продуцентов и консументов, также как и взаимодействия типа «хищник-жертва», описываются системами дифференциальных уравнений типа Лотка-Вольтерра [17-20]. Согласно [19,20], обобщенно вольтерровские модели имеют следующий вид:

$$\frac{dN_i}{dt} = N_i \left(\varepsilon_i - \sum_{j=1}^n \gamma_{ij} N_j \right), i = \overline{1, n},$$

где n – число видов в системе, N_i – численность вида i , ε_i – естественный прирост-убыль вида i ; γ_{ij} – элементы матрицы сообщества $\Gamma = \|\gamma_{ij}\|$, которая описывает отношения между видами.

Выбор методов и стратегий распределения данных может сделать распределенную программно-информационную систему полностью самоорганизующейся, как с точки зрения способности автоматически поддерживать себя, так и с точки зрения дальнейшего саморазвития и самосовершенствования.

Один из таких методов был предложен в [21], на основе сочетания рассмотренного выше алгоритма организации растущей базы данных из [4,5] и модели «кучи песка» из [22], демонстрирующей явление самоорганизованной критичности.

Исходная модель «кучи песка» рассматривает модельное пространство как двумерное незамкнутое клеточное. В каждой клетке может находиться от 0 до n песчинок (в [22] $n=3$). В целом, модельное пространство представляет собой стол, чье пространство поделено на клетки (ячейки) и имеет размер $L \times L$ (например, $L=100$). В каждый момент времени в произвольную клетку стола может быть добавлена только одна песчинка. Если высота столбика песчинок в клетке меньше n , то песчинка остается в текущей клетке, увеличивая высоту столбика. Если же высота столбика после добавления песчинки становится выше критического значения n , то песчинка скатывается в одну из произвольно выбранных смежных ячеек (их четыре, так как используется соседство фон Неймана [3]). Там процесс повторяется: песчинка либо остается в ячейке, либо скатывается в смежную, и т.д. Таким образом, возникает цепь событий, называемая лавиной. Количество элементарных событий в цепи называется длиной лавины. В [22] была установлена взаимосвязь между длиной s лавины осыпания и частотой обнаружения лавин с подобной длиной $N(s)$ в виде фрактального отношения $N(s) \sim s^{-\tau}$. Зависимость превращается в линейную при использовании двойной логарифмической шкалы.

Характерным свойством модели «кучи песка»

из [22] была возможность осыпания песчинок за край стола. Введенная в [21] модификация модели исходила из невозможности такого исхода, так как песчинки моделировали порции данных, и их потеря означала бы потерю данных, что недопустимо с точки зрения семантики предметной области. Поэтому модификация модели состояла в том, что, во-первых, пространство рассматривалось как тороидальное замкнутое, а во-вторых, что с заданной вероятностью p столбик песчинок с высотой более критической мог «проваливаться» сквозь ячейку, моделируя тем самым архивацию данных и освобождение памяти узла.

Результаты моделирования, приведенные в [21], показали, что для модифицированной модели «кучи песка» в системе преобладают короткие события и характер зависимости, описывающей длину лавины, меняется со степенной на показательную: $N(s) \sim e^{ks+b}$, $1 < k < 0$.

Это важно с той точки зрения, что добавление данных будет происходить достаточно быстро, с небольшим числом пересылок между узлами, потерь данных не будет и сама информационная система способна обеспечить свою самоупорядоченность.

Приведенные методы, однако, позволяют выделить и исследовать только некие отдельные последовательности событий в системе, не давая представление о ее динамике в целом.

Для получения такого представления и исследования динамики всей распределенной растущей базы данных в целом предлагается рассматривать рост и распространение базы данных как волновой процесс в реакционно-диффузионной системе, а для его изучения использовать уравнение Фишера-Колмогорова-Петровского-Пискунова (Фишера-КПП) [20; 23-25].

Методология. Специфика рассмотренной ранее модифицированной модели «кучи песка» из [21] стоит в том, что модельная песчинка (порция данных) может быть перенаправлена в произвольную смежную ячейку, без учета анализа ее состояния. Выбранное направление может стать как выигрышным, так и проигрышным, приводящим к длинной лавине изменений.

Для того, чтобы рационализировать используемый метод, будем полагать, что локальные копии СУБД, размещенные в вычислительных узлах, обладают способностью устанавливать взаимодействия с аналогичными экземплярами локальных копий СУБД из смежных узлов, то есть могут функционировать в режиме клиент-сервер.

В этом случае локальная копия СУБД, под управлением которой находятся уже заполненные файлы баз данных, далее не пополняемые новыми данными, может произвести опрос копий СУБД в смежных ячейках с целью определения ячейки со свободной памятью, в которую и могут быть перенаправлены добавляемые данные.

При этом процесс заполнения рассредоточен-

ных по ячейкам локальных баз данных, образующих целостную распределенную базу данных, напоминает процесс горения [26]. Этот процесс математически может быть описан с помощью модели Фишера-Колмогорова-Петровского-Пискунова (Фишера-КПП) [20; 23-25]. Помимо горения, модель описывает процессы распространения генов в популяциях и видов в биоценозах [20, 23, 24], реакционно-диффузионные системы и химические волны [25].

Для общности и удобства будем в дальнейшем считать, что модель Фишера-КПП описывает распространение некоего автокаталитического процесса в одномерном пространстве:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = kN(1 - N) + D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2}.$$

Автокаталитический процесс – это процесс с положительной обратной связью, в результате которого количество одного из участвующих в процессе исходных компонентов (автокатализатора) увеличивается.

Первое слагаемое по существу является логистической функцией, определяющей автокаталитическое воспроизводство N . Второе слагаемое определяет увеличение N за счет диффузии в пространстве. Коэффициент D – это коэффициент диффузии, k – коэффициент роста. В целом уравнение описывает волновой процесс распространения.

Несмотря на то, что в приведенной версии

уравнения Фишера-КПП используется только одна пространственная координата, изначально в [24] задача рассматривалась для случая двумерного пространства. Число координат было уменьшено в целях упрощения благодаря симметрии.

Для решения уравнения принимается, что $N(x, t) = \eta(x + \lambda t) = \eta(z)$. Для особого случая, когда скорость волны $\lambda = \pm \frac{5}{\sqrt{6}}$, решения имеют форму [27]:

$$\eta(z) = \left(\pm 1 + Ce^{\mp z/\sqrt{6}} \right)^{-2}, \quad \eta(z) = \frac{1 + Ce^{\mp z/\sqrt{6}}}{\left[1 + Ce^{\mp z/\sqrt{6}} \right]^2},$$

где C – произвольная постоянная.

Согласно [25], устойчивый волновой фронт наблюдается при скорости распространения процесса $v=2$, что составляет $v = 2\sqrt{kD}$ в размерных единицах. При этом за скорость фронта отвечает только ведущий краевой участок, где концентрация $N \approx 0$, а ограничивающим квадратичным членом kN^2 можно пренебречь.

Результаты. В статье было изложено несколько стратегий организации растущих распределенных баз данных. Результаты сопоставления этих стратегий с точки зрения обеспечения наличия и характера процессов самоорганизации приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты сопоставления стратегий организации растущих распределенных баз данных с точки зрения наличия процессов самоорганизации

Название стратегии	Наличие процессов самоорганизации и характер этих процессов	Математические методы, используемые для исследования процессов самоорганизации
Организация растущих баз данных с применением теории клеточных автоматов	Когерентная самоорганизация в виде формирования устойчивых упорядоченных конфигураций в клеточном пространстве	Методы теории клеточных автоматов, теория самоорганизованной критичности, модель Фишера-КПП
Организация растущих баз данных с применением теории клеточных автоматов в сочетании с традиционным мультиагентным подходом, в том числе реализующим «муравьиные» алгоритмы	Когерентная самоорганизация в виде формирования устойчивых упорядоченных конфигураций в клеточном пространстве, а также в виде формирования коллективов программных агентов	Методы теории клеточных автоматов, теория самоорганизованной критичности, модель Фишера-КПП, модели коллективного поведения («муравьиные» алгоритмы)
Организация растущих баз данных с применением теории клеточных автоматов в сочетании с парадигмой неравновесного программирования, методами теории нумераций и домено-ориентированного подхода	Когерентная самоорганизация в виде формирования устойчивых упорядоченных конфигураций в клеточном пространстве; континуальная самоорганизация как формирование новых программных структур (цифровых организмов) и их сообществ на основе фрагментов кода из баз данных	Методы теории клеточных автоматов, теория самоорганизованной критичности, модель Фишера-КПП, модель Лотка-Вольтерра

Все эти стратегии имеют под собой общую основу, которая предлагает рассматривать пространство узлов информационно-вычислительной сети как пространство модели клеточного автомата, где роль клеток выполняют отдельные узлы вычислительной сети. Исходя из семантики предметной области, состояния клеток представляют собой состояния узлов сети с точки зрения обеспечения возможности хранения фрагментов распределенной базы данных. Множество таких состояний было указано в статье.

Подобная концепция позволяет применить мате-

матические методы для исследования эволюции и роста распределенных темпоральных баз данных. Это методы теории клеточных автоматов, биофизики и математической биологии (модели типа Лотка-Вольтерра), теории дифференциальных уравнений (системы дифференциальных уравнений типа Лотка-Вольтерра и уравнение Фишера-КПП), теории самоорганизованной критичности.

Применение перечисленных математических методов позволяет создавать самоорганизующиеся информационные и программно-информационные совокупности и прогнозировать динамику их по-

ведения.

В случае систем дифференциальных уравнений типа Лотка-Вольтерра прогноз затрагивает развитие сообществ программных агентов, организующих и обслуживающих распределенные растущие базы данных. Данный тип модели позволяет предсказывать видовой и численный состав сообществ программных агентов и цифровых организмов, рассматривая совокупности данных лишь в качестве субстрата для формирования таких сообществ.

Методы теории самоорганизованной критичности позволяют исследовать лавины событий, возникающих в распределенных растущих базах данных при добавлении новых порций данных. Однако эти результаты позволяют исследовать лишь отдельные цепи событий, не позволяя исследовать динамику развития и территориального распределения всей совокупности данных в целом.

Применение методов теории клеточных автоматов, а также модели Фишера-КПП для описания динамики формирования распределенной базы данных

позволяет предсказать свойства этой динамики на глобальном уровне всего виртуального клеточного пространства сети.

Но если теория клеточных автоматов позволяет провести лишь имитационный эксперимент, то модель Фишера-КПП на аналитическом уровне предсказывает, что в клеточном пространстве информационно-вычислительной сети будут наблюдаться волновые процессы, связанные с распространением фрагментов базы данных в свободные ячейки. Эти волновые процессы будут соответствовать изменениям концентрации данных в ячейках, которая будет меняться как вследствие высвобождения ячеек («провалившиеся» песчинки, представляющие заархивированные данные, освобождают ячейки), так и вследствие появления новых данных и их диффузии по пространству модели.

Эти результаты обобщены в таблице 2 и позволяют провести выбор методов моделирования с целью исследования динамики эволюции растущих распределенных совокупностей данных.

Таблица 2 – Методы исследования динамики поведения растущих распределенных баз данных в случае двумерного клеточного виртуального пространства модели

Название метода	Исследуемые свойства растущих распределенных баз данных
Методы теории клеточных автоматов	Формирование устойчивых (в том числе динамически устойчивых) упорядоченных структур в пространстве модели
Системы уравнений типа Лотка-Вольтерра	Исследование формирования сообществ цифровых организмов, обслуживающих растущие распределенные базы данных; исследование процессов обработки данных из растущих распределенных совокупностей
Методы теории самоорганизованной критичности	Исследование цепей событий (лавин), связанных с добавлением новых данных в растущие распределенные базы данных
Модель Фишера-КПП	Исследование глобальных процессов роста распределенных баз данных как волновых процессов

Обсуждение. На фоне современных технологий *BigData* развитие биоинспирированных стратегий может показаться избыточным и ненужным. Однако по своей сути *BigData* исходят из развития детерминистической централизованной парадигмы, в которой управление всеми процессами организуется по иерархической схеме и в конечном счете сводится к некоторому центру управления [1; 28-33]. Эта парадигма имеет такие преимущества, как очевидность и прозрачность, но системы подобного рода не способны эволюционировать и самосовершенствоваться. Также современные технологии управления большими данными требуют для своей поддержки мощных аппаратных средств, приобретение и обслуживание которых затратно.

Стратегии, рассматриваемые в настоящей статье, позволяют создавать системы хранения и обработки больших совокупностей данных, способные обслуживать самих себя. Кроме того, для хранения данных в этом случае могут быть использованы любые вычислительные средства, а не только высокопроизводительные. Такой подход сродни концепции «туманных вычислений» (*fog computing*) [34-36].

Одна из проблем, затрудняющих развитие самоорганизующихся программных и аппаратных

систем, состоит в наличии малого числа аналитических методов, способных однозначно предсказывать поведение таких систем, да и то лишь в некоторых случаях.

С этой точки зрения предложенное в данной статье применение модели Фишера-КПП для описания динамики поведения распределенной растущей совокупности данных является важным результатом, так как модели типа «реакция-диффузия» уже достаточно хорошо изучены и позволяют предсказывать динамику поведения описываемых ими систем для различных значений исходных параметров.

Но, как уже отмечалось выше, дальнейшее развитие биоинспирированных методов организации вычислений невозможно в отрыве от развития методов математического анализа, биофизики и математической биологии, а в этих сферах, к сожалению, наблюдается некоторая стагнация.

Выводы. Развитие экономики данных, широкое применение методов *BigData* и *DataScience* потребуют, в свою очередь, автоматизации методов организации и управления большими совокупностями данных. Такая автоматизация должна быть полной, то есть совокупности данных

должны поддерживать упорядоченную структуру с минимальным участием человека, а в идеале и без такового.

В этой связи стратегии и методы, рассмотренные в данной статье, и результаты их применения имеют большое практическое значение и перспективны с точки зрения дальнейших исследований.

Эти методы позволяют представить растущие распределенные совокупности данных как самоорганизующиеся системы или части таких систем, то есть способные к самоупорядочению структуры. Преимущество таких структур состоит в том, что они могут поддерживать и развивать себя сами, с минимальным участием человека или без такового, в силу несложных правил своей организации, заданных в терминах локальных взаимодействий.

В данной статье были проанализированы стратегии организации таких структур и математические методы, которые могут быть использованы для проектирования растущих распределенных баз данных. Впервые было предложено рассматривать процесс роста распределенных структур данных как волновой процесс типа «реакция-диффузия» и применить для исследования эволюции данных структур модель Фишера-КПП. В перспективе применение этой модели позволит не только исследовать эволюцию и рост в пространстве и времени какой-то отдельной базы данных, но и взаимодействие нескольких баз данных, размещаемых в одном виртуальном пространстве вычислительных узлов.

Результаты данной работы могут иметь широкое применение в любых предметных областях, где используются распределенные базы данных, содержащие темпоральные данные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Грас, Д. DataScience. Наука о данных с нуля / Д. Грас. – СПб: БХВ-Петербург, 2022. – 416 с.
2. Böhlen, M. Temporal Statement Modifiers / M. Böhlen, C.S. Jensen, R.T. Snodgrass // ACM Transactions on Database Systems – 2000. – Vol. 25, No. 4 – P. 407-456.
3. Нейман, Дж. фон. Теория самовоспроизводящихся автоматов: пер. с англ. / Дж. фон. Нейман. – М.: Мир, 1971. – 382 с.
4. Кольчугина, Е.А. Алгоритмы обработки данных на основе методов биокibernетики / Е. А. Кольчугина // Современные информационные технологии: тр. Междунар. науч.-техн. конф. (Computer-based conference). Вып. 4 / под ред. В.Б. Моисеева, Л.Г. Когельмана, С.В. Трубицкова. – Пенза: Пензенская государственная технологическая академия, 2006. – С. 68-71.
5. Кольчугина, Е.А. Искусственные миры: распределение данных / Е.А. Кольчугина // Программные продукты и системы. – 2013. – № 3. – С. 185-189. – <http://www.swsys.ru/index.php?page=article&id=3585>
6. Волчихин В.И., Карамышева Н.С., Горынина А.В., Зинкин С.А. Разработка сетевых агентно-базированных приложений на основе метакомпьютерной технологии // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2021. № 4. С. 3-25. doi:10.21685/2072-3059-2021-4-1.
7. Dorigo, M. The Ant Colony Optimization Meta-Heuristic/New Ideas in Optimization / M. Dorigo, G. Di Caro ; eds. D. Corne, M. Dorigo, F. Glover. – London: McGraw-Hill, 1999. – P. 11-32.

8. Svenson, P. Determining Possible Avenues of Approach Using ANTS / P. Svenson, H. Sidenbladh // 6th International Conference on Information Fusion. – Cairns, Australia, 2003. – P. 1110-1117.
9. Langton, C.G. Studying Artificial Life with Cellular Automata / C. G. Langton // Physica D: Nonlinear Phenomena. – 1986. – Vol. 22 (Iss. 1-3). – P. 120-149.
10. Кольчугина, Е.А. Моделирование перемещений особи / Е.А. Кольчугина // Новые информационные технологии и системы: тр. VI Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2004. – С. 246-249.
11. Ершов, Ю.Л. Теория нумераций / Ю.Л. Ершов. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит, 1977. – 416 с.
12. Линьков, В.М. Нумерационные методы в проектировании систем управления данными: моногр. / В.М. Линьков. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. техн. ун-та, 1994. – 156 с.
13. Мальцев, А.И. Алгоритмы и рекурсивные функции / А.И. Мальцев. – 2-е изд. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 368 с.
14. Кольчугина, Е.А. Неравновесное программирование / Е.А. Кольчугина // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 3 (11). – С. 25-31. – https://izvuz_tn.pnzgu.ru/files/izvuz_tn.pnzgu.ru/3309.pdf
15. Кольчугина, Е.А. Структура цифрового организма в самоорганизующихся программных системах / Е.А. Кольчугина // Программные продукты и системы. – 2012. – № 2. – С. 51-54. – <http://www.swsys.ru/index.php?page=article&id=3112>
16. Кольчугина, Е.А. Организация баз данных и распределенный информационный поиск / Е.А. Кольчугина // Современные информационные технологии: тр. Междунар. науч.-техн. конф. (осенняя сессия) (Computer-based conference). Пенза: Пензенская государственная технологическая академия, 2005. Вып. 2. С. 95-97
17. Lotka, A. Elements of Physical Biology / A. Lotka. Baltimore: Williams & Wilkins Company, 1925. 495 p.
18. Lotka, A. Contribution to the Energetics of Evolution / A. Lotka // Proceedings of the National Academy of Sciences. 1922. Vol. 8, № 6. P. 147-151.
19. Вольтерра, В. Математическая теория борьбы за существование / В. Вольтерра. М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. 288 с.
20. Ризниченко, Г.Ю. Биофизическая динамика продукционных процессов / Г.Ю. Ризниченко, А.Б. Рубин. – М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. – 464 с.
21. Кольчугина, Е.А. Теоретические основы построения самоорганизующихся программных систем с самоорганизацией континуального типа: дис. ... док. техн. наук: 05.13.17 / Кольчугина Е. А. Пенза, 2017. 295 с. – <https://search.rsl.ru/ru/record/01009437359>
22. Бак, П. Как работает природа: Теория самоорганизованной критичности: пер. с англ. / П. Бак; вступ. ст. Г.Г. Малинецкого. М.: УРСС: ЛИБРОКОМ, 2013. 276 с
23. Fisher, R.A. The Wave of Advance of Advantageous Genes / R.A. Fisher // Annals of Eugenics. – 1937. – Vol. 7. – P. 355-369.
24. Колмогоров А.Н., Петровский Н.Г., Пискунов Н.С. Исследование уравнения диффузии, соединенной с возрастанием вещества, и его применение к одной биологической проблеме / А.Н. Колмогоров, Н.Г. Петровский, Н.С. Пискунов // Бюллетень МГУ. Сер. А, Математика и механика. – 1937. – Т.1. – С. 1-16.
25. Ванат, В.К. Диссипативные структуры в реакционно-диффузионных системах / В.К. Ванат. – Ижевск: Институт компьютерных исследований, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2008. – 300 с.
26. Шишов, В.Ф. Прогнозирование вероятности возникновения лесных пожаров / В.Ф. Шишов, А.Ю. Козлов, Н.А. Черняева // Экономика и управление. – 2013. – № 3(89). – С. 33-37. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18953296>
27. Полянин А.Д., Зайцев В.Ф. Справочник по нелинейным уравнениям математической физики / А.Д. Полянин, В.Ф. Зайцев. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 432 с.
28. Feng, H., Ma, R., Yan, L., Ma, Z., Spatiotemporal Prediction Based on Feature Classification for Multivariate Floating-Point Time Series Lossy Compression / H. Feng, R. Ma, L. Yan, Z. Ma

// Big Data Research. – 2023. – Vol. 32. – 100377. – <https://doi.org/10.1016/j.bdr.2023.100377>.

29. Baride, S., Saxena, A.S., Goyal, V., Efficiently Mining Colocation Patterns for Range Query / S. Baride, A.S. Saxena, V. Goyal // Big Data Research. – 2023. – Vol. 31. – 100369. – <https://doi.org/10.1016/j.bdr.2023.100369>

30. Allani, S., Chbeir, R., Salameh, K., Mansour, E., Arnould, P., A Multi-Objective Clustering for Better Data Management in Connected Environment / S. Allani, R. Chbeir, K. Salameh, E. Mansour, P. Arnould // Big Data Research. – 2022. – Vol. 30. – 100347. – <https://doi.org/10.1016/j.bdr.2022.100347>

31. Pourghebleh, B., Navimipour, N.J., Data aggregation mechanisms in the Internet of things: A systematic review of the literature and recommendations for future research / B. Pourghebleh, N.J. Navimipour // Journal of Network and Computer Applications. – 2017. – Vol. 97. – P. 23-34. – <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2017.08.006>

32. Ahmed, H., Ismail, M. A., A Structured Approach Towards Big Data Identification / H. Ahmed, M.A. Ismail // IEEE Transactions on Big Data. – 2021. – Vol. 9. – no. 1. – P. 147-159. – doi: 10.1109/TBDDATA.2021.3139069

33. Mohan, R., Chaudhury, S., Lall, B., Temporal Causal Modelling on Large Volume Enterprise Data / R. Mohan, S. Chaudhury, B. Lall // IEEE Transactions on Big Data. – 2021. – Vol. 8. – no. 6. – P. 1678-1689. – doi: 10.1109/TBDDATA.2021.3053879

34. De Donno, M., Tange, K., Dragoni, N., Foundations and Evolution of Modern Computing Paradigms: Cloud, IoT, Edge, and Fog / M. De Donno, K. Tange, N. Dragoni // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 150936-150948. – doi: 10.1109/ACCESS.2019.2947652

35. Mann, Z. A., Decentralized Application Placement in Fog Computing / Z.A. Mann // IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems. – 2022. – Vol. 33, No. 12. – P. 3262-3273. – doi: 10.1109/TPDS.2022.3148985

36. Matt, C. Fog Computing / C. Matt // Business & Information Engineering. – 2018. – Vol. 60, № 4. – P. 351-355.

Статья поступила в редакцию 25.08.2023

Статья принята к публикации 15.12.2023

УДК 004.4

EDN: LRLLGJ

**АППАРАТНЫЙ МОДУЛЬ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЦИФРОВОГО СИНТЕЗА
ЧАСТОТЫ НА БАЗЕ ПРОГРАММИРУЕМОЙ ЛОГИЧЕСКОЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ СХЕМЫ**

© Авторы 2023

SPIN: 5470-1289

AuthorID: 650911

ORCID: 0000-0002-3358-4394

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

Пензенский государственный технологический университет

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

SPIN: 2454-0080

AuthorID: 472534

ORCID: 0009-0009-8254-9606

ЧЕРНЕЦКАЯ Ирина Евгеньевна, доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Вычислительная техника»

Юго-Западный государственный университет

(305004, Россия, г. Курск, ул. Челюскинцев, д. 19/2, e-mail: vt.swsu@yandex.ru)

SPIN: 9743-8350

AuthorID: 885871

ORCID: 0000-0003-4114-7036

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

Пензенский государственный технологический университет

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

SPIN: 7126-7682

AuthorID: 428445

ORCID: 0000-0003-3176-0531

САЛЬНИКОВ Игорь Иванович, доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Программирование»

Пензенский государственный технологический университет

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

Аннотация. Основная идея статьи заключается в разработке аппаратного модуля вычислительной системы для цифрового синтеза частоты на базе программируемых вентиляльных матриц (ПЛИС), предназначенного для обеспечения со стороны ПЛИС прямого цифрового синтеза запрограммированной частоты и вывода значений на цифро-аналоговый преобразователь. Проанализировав возможные альтернативные варианты разработки аппаратного модуля, авторы предлагают вариант реализации его с применением ПЛИС. Модуль должен выполнять следующие функции: полоса частот до 20 МГц; шаг установки частоты 0,1 Гц; генерация гармонических сигналов в форме прямоугольных, треугольных и синусоидальных колебаний; независимое управление частотой и фазой; совместимость со стандартом *USB*. В статье подробно описан разработанный аппаратный модуль цифрового синтеза частоты на базе ПЛИС, предназначенный для обеспечения со стороны ПЛИС прямого цифрового синтеза запрограммированной частоты и вывода значений на цифро-аналоговый преобразователь. Работа устройства состоит в обеспечении со стороны ПЛИС прямого цифрового синтеза запрограммированной частоты и вывод значений на цифро-аналоговый преобразователь. Управление устройством осуществляется с помощью персонального компьютера, через аппаратный мост *USB-FIFO* по стандарту *USB 2.0*. Полученные результаты удовлетворяют поставленным цели и задачам. Разработано текстовое описание проекта ПЛИС на языке *VHDL-1993*. Предлагаемый аппаратный модуль вычислительной системы для цифрового синтеза частоты на базе ПЛИС может найти применение в качестве: источника опорного сигнала для генераторов с петлей фазовой автоподстройки частоты, прямого синтеза радиосигналов; тактового генератора в промышленном оборудовании и медицинских системах и т.п.

Ключевые слова: аппаратный модуль, микроконтроллер, персональный компьютер, ПЛИС, прямой цифровой синтез, цифровой вычислительный синтезатор, цифровой синтез частоты.

**HARDWARE MODULE OF COMPUTING SYSTEM FOR DIGITAL FREQUENCY SYNTHESIS
ON THE BASIS OF PROGRAMMABLE LOGIC INTEGRATED CIRCUIT**

© The Authors 2023

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

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

CHERNETSKAYA Irina Evgenievna, doctor of technical sciences, associate professor,
head of the Department of Computer Science
Southwestern State University

(305004, Russia, Kursk, Chelyuskintsev Street, 19/2, e-mail: vt.swsu@yandex.ru)

DANILOV Evgeny Alexandrovich, candidate of technical sciences, associate professor of Programming Department
Penza State Technological University

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

SALNIKOV Igor Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, professor of Programming Department
Penza State Technological University

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

Abstract. The main idea of the article is to develop a hardware module of a computing system for digital frequency synthesis based on a programmable valve matrixes (FPGA), designed to provide on the FPGA side a direct digital synthesis of the programmed frequency and output the values to a digital-to-analogue converter. Having reviewed possible alternatives for the development of the hardware module, the authors propose a variant of its implementation with the use of FPGA. The module should fulfil the following functions: frequency bandwidth up to 20 MHz; frequency setting step 0.1 Hz; generation of harmonic signals in the form of rectangular, triangular and sinusoidal oscillations; independent control of frequency and phase; compatibility with the *USB* standard. The paper describes in detail the developed hardware module of digital frequency synthesis based on FPGA, designed to provide on the FPGA side of the direct digital synthesis of the programmed frequency and output values to the digital-to-analogue converter. Operation of the device consists in providing on the FPGA side of the direct digital synthesis of the programmed frequency and output values to a digital-to-analogue converter. The device is controlled by a personal computer, via a *USB-FIFO* hardware bridge according to the *USB 2.0* standard. The obtained results satisfied the aim and objectives. A text description of the FPGA design in the VHDL-1993 language has been developed. The proposed hardware module of a computing system for digital frequency synthesis based on FPGA can be used as: a source of reference signal for oscillators with a phase locked loop, direct synthesis of radio signals; clock generator in industrial equipment and medical systems, etc.

Keywords: hardware module, microcontroller, personal computer, FPGA, direct digital synthesis, digital computational synthesizer, digital frequency synthesis.

Для цитирования: Мартышкин А.И. Аппаратный модуль вычислительной системы для цифрового синтеза частоты на базе программируемой логической интегральной схемы / А.И. Мартышкин, И.Е. Чернецкая, Е.А. Данилов, И.И. Сальников // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 12. – № 4(64). – С. 80-88. – EDN: LRLGJ.

Введение. В современной радиотехнической индустрии системы синтеза частот и сигналов занимают центральное место, что акцентирует важность процесса синтеза и необходимость разработки более продвинутых систем, а также улучшения модернизации технологий синтеза частот. Особое внимание в этом контексте привлекают цифровые вычислительные синтезаторы (ЦВС), также известные как прямые цифровые синтезаторы (*Direct Digital Synthesizer, DDS*). Эти устройства находят широкое применение, как в генерации, так и в приёме и обработке сигналов. Благодаря развитию микросхемотехники и технологии ЦВС представляют собой высокоэффективные, компактные микросхемы с низким уровнем энергопотребления.

В современной инженерной практике возможности интеграции программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) активно реализуются в разнообразных проектах, охватывающих широкий спектр приложений. Вместе с тем применение IP-ядер приобретает особую значимость, играя ключевую роль в проектировании и разработке. Наличие предварительно разработанных и проверенных модулей часто становится решающим фактором при выборе аппаратной платформы для реализации конкретных задач.

Итак, целью работы является создание аппаратного модуля вычислительной системы ЦВС, способного генерировать прямоугольные, треугольные и синусоидальные гармонические сигналы в схеме с использованием ПЛИС фирмы *Xilinx* семейства Spartan-6. Работа устройства должна состоять в обеспечении со стороны ПЛИС прямого цифрового синтеза запрограммированной частоты и вывод значений на цифро-аналоговый преобразователь. Управление устройством осуществляется с помощью персонального компьютера, через аппаратный мост *USB-FIFO* по стандарту *USB 2.0*. Устройство должно выполнять следующие функции: полоса частот до 20 МГц; шаг установки частоты 0,1 Гц; генерация гармонических сигналов в форме прямоугольных, треугольных и синусоидальных колебаний; независимое управление частотой и фазой; совместимость со стандартом *USB*. Необходимо разработать текстовое описание проекта ПЛИС на языке *VHDL-1993*.

Методология. В трудах Г. Шилда [1] осуществляется комплексный анализ структуры и базовых принципов проектирования устройств на основе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Работа включает детальный обзор и критический анализ различных методик

проектирования, охватывающих традиционные схемотехнические подходы, моделирование с использованием языков описания аппаратуры, а также методы логического синтеза. Авторы также рассматривают новейшие направления в дизайне ПЛИС, связанные с применением языков программирования C/C++. Автор также затрагивает специализированные темы, включая разработку программно-аппаратных комплексов и создание систем для цифровой обработки сигналов (ЦОС). Аналогичные исследования представлены в работах [2-4] и [5-7].

Исследования З. Наваби [8] нацелены на предоставление комплексных знаний для самостоятельного освоения проектирования встроенных микропроцессорных систем на базе ПЛИС от *Xilinx*. В работе представлен глубокий анализ характеристик, архитектуры и систем команд микропроцессорных ядер, в частности семейств *PicoBlaze™* и *MicroBlaze™*, являющихся ключевыми компонентами для разработки встраиваемых систем. Также освещаются детали разработки 8-разрядных микропроцессорных систем на основе *FPGA*, с акцентом на интеграцию ядер *PicoBlaze* [9].

Для обеспечения связи между разрабатываемым устройством и персональным компьютером используется *PCI*-шина стандарта 2.1 [10].

Фундаментальные принципы проектирования на ПЛИС с применением языка *VHDL* подробно освещены в работах [11-14]. Эти источники подробно охватывают основы программирования на *VHDL* и специфические аспекты разработки вычислительных устройств, нацеленных на воплощение в ПЛИС. Проанализированы методы создания специализированных конвейерных устройств и предложена методика их проектирования с использованием *VHDL*.

Ниже будет представлен анализ потенциальных подходов к реализации устройства [15]. Основной задачей является создание устройства, способного генерировать гармонические сигналы прямоугольной, треугольной и синусоидальной формы, как с модуляцией, так и без неё. В рамках статьи будут рассмотрены различные варианты конструктивных и технологических решений, позволяющих достичь поставленных технических параметров устройства.

Понятие «синтезатор частоты» описывает электронное устройство, которое способно формировать выходной сигнал с заданной частотой или набором частот в соответствии с поступающими управляющими сигналами. Известны многочисленные методологии синтеза сигналов, среди которых наиболее широкое применение находят следующие техники:

1. Генерация сигналов с использованием техники широтно-импульсной модуляции (ШИМ);
2. Прямое цифровое формирование сигналов (*DDS*).

На рисунке 1 представлена базовая схема генератора, построенная на основе принципа широтно-

импульсной модуляции (ШИМ). В данной концепции микроконтроллер (МК) выполняет роль главного компонента [16]. Методика ШИМ предоставляет возможность управлять длительностью импульсов, что в свою очередь влияет на амплитуду выходного сигнала. Путем изменения ширины импульсов можно манипулировать уровнями напряжения на выходе фильтра и настраивать их в пределах от нуля до уровня напряжения питания. Итак, путем программирования МК для модуляции длительности импульсов, можно генерировать сигналы различных форм, включая синусоидальные.

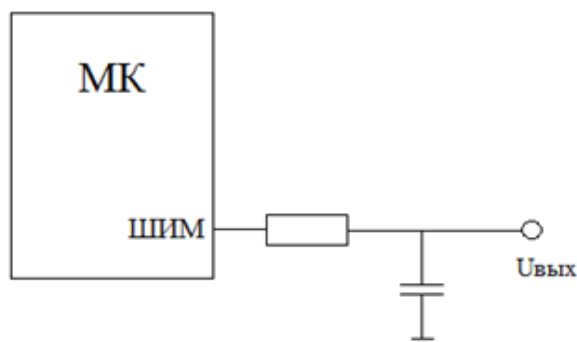


Рисунок 1 – Базовая схема генератора, построенная на основе принципа ШИМ

Представленное устройство является бюджетным решением для трансформации цифрового сигнала в аналоговый с применением микроконтроллеров. Одной из особенностей его конструкции является отсутствие необходимости использования специализированных интегральных микросхем или сложных схемотехнических решений. Главным компонентом при создании данного генератора является правильное проектирование выходного фильтра, который гарантирует достижение заданной частоты среза. Однако следует подчеркнуть, что обеспечение высокой точности и низкого уровня гармонических искажений представляет собой сложную техническую проблему.

Для достижения более высокой точности и качества синусоидального сигнала можно воспользоваться генератором, созданным на основе *DDS*. Так как генерация процесса осуществляется в цифровом ракурсе, необходимо применить цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП). Для генерации синусоидальной волны в ЦАП используется последовательность дискретных отсчетов синусоидальной функции с заранее заданной частотой дискретизации (*FCLK*). Из-за сложности прямого цифрового расчета синусоидальной функции применяется табличный метод. В этом методе специальная таблица (*Look Up Table – LUT*), хранящаяся в ПЗУ, используется для преобразования фазы в значение синусоидальной функции. Фаза подвергается линейным изменениям в течение определенного времени, и эта последовательность фаз с линейной динамикой используется для генерации отсчетов синусоидального сигнала, которые передаются на

вход ЦАП, где формируется аналоговый сигнал. После этого сигнал проходит через аналоговый фильтр низких частот, что приводит к получению на

выходе синусоидального сигнала.

Элементарная структура генератора на основе DDS показана на рисунке 2.

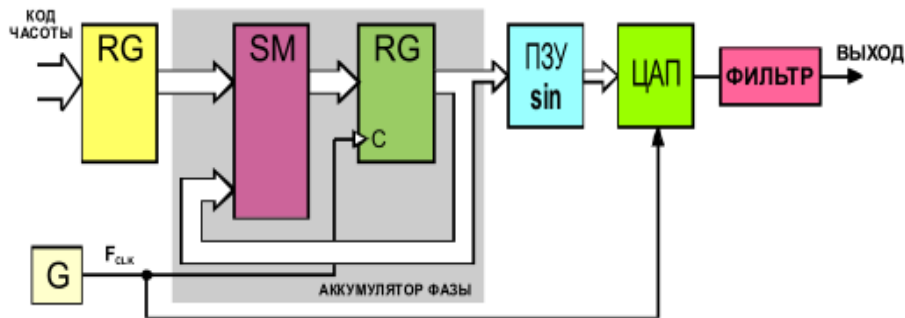


Рисунок 2 – Элементарная структура генератора на основе DDS

Для реализации разрабатываемого устройства выбран вариант синтеза на ПЛИС семейства *Spartan-6*, так как ПЛИС имеет высокое быстродействие, что является одним из основных требований к DDS.

Результаты. На начальном этапе проектирования функциональной схемы устройства необходимо выбрать наиболее оптимальную ее структуру. В состав схемы входят:

- аппаратный мост *USB-FIFO FT245RL* фирмы *FTDI*;
- ПЛИС семейства *Spartan-6 XC6SLX9* фирмы *Xilinx*;
- конфигурационное ПЗУ *XCF04S* объемом 4Мбит;
- генератор частоты 100 МГц;
- двухканальный 14-битный ЦАП *AD9767* фирмы *Analog Devices*.

Предлагаемая схема представлена на рисунке 3.

Управление устройством осуществляется с ПЭВМ. Поддержка интерфейса с ПЭВМ реализуется мик-

росхемой *FT245RL* обеспечивающей подключение по шине *USB 2.0* [15]. Обмен данными ПЛИС обеспечивается по параллельной 8 битной шине в асинхронном режиме. При включении питания из конфигурационного ПЗУ ПЛИС автоматически происходит загрузка прошивки через встроенный разъем *JTAG*, для чего используется кабель, соединяющий *JTAG*-разъем с портом персонального компьютера, а также программное обеспечение, установленное на компьютере. Основная задача ПЛИС заключается в реализации ядра *IP* для генератора *DDS*. Источник тактового сигнала *DDS* имеет ключевое значение для фазовой стабильности. Встроенное устройство для умножения тактовой частоты в ПЛИС не является оптимальным, так как это может привести к увеличению фазового шума тактового сигнала пропорционально множителю частоты (рис. 4). По этой причине предпочтение отдается использованию внешнего высококачественного генератора опорной частоты.

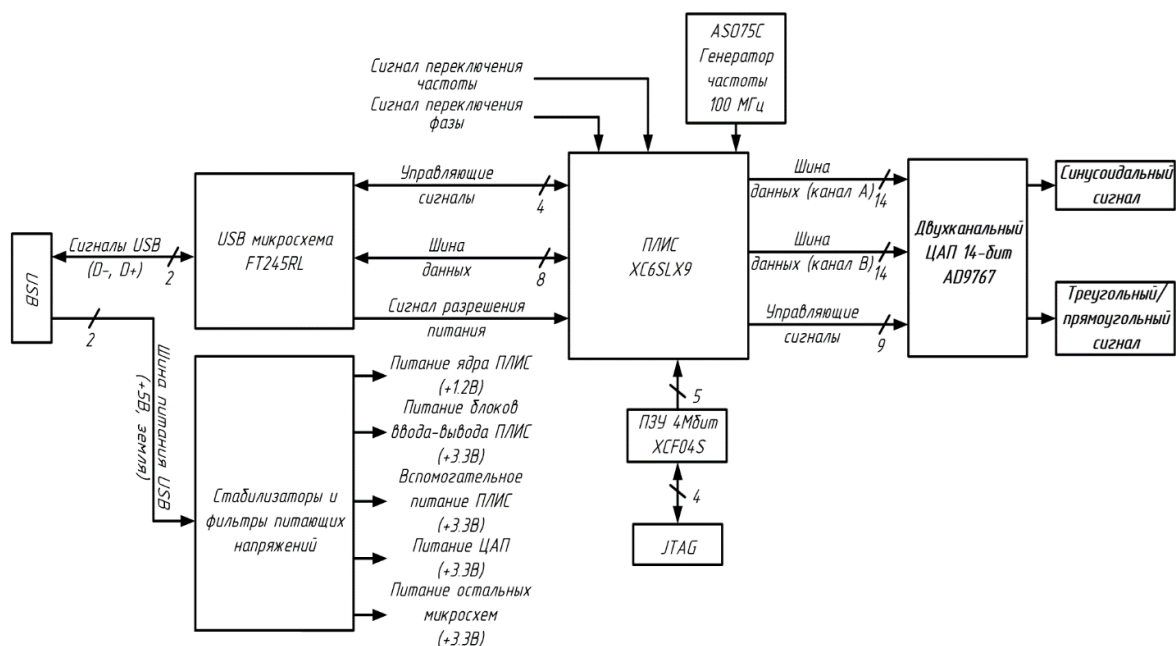


Рисунок 3 – Функциональная схема устройства

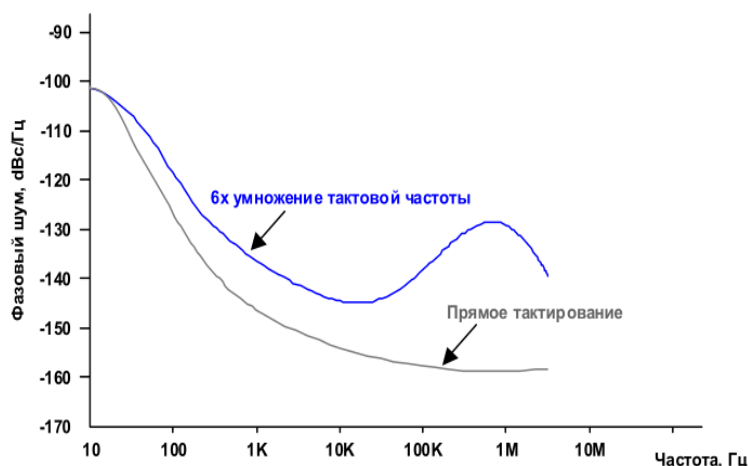


Рисунок 4 – Характерный уровень фазового шума в DDS

Для достижения желаемой максимальной выходной частоты критически важно строго соблюдения следующее условие: отношение частоты дискретизации к максимальной частоте выходного сигнала должно быть больше четырех [17-19]. При нацеливании на максимальную выходную частоту в 20 МГц оптимальным решением будет установка частоты опорного генератора на уровне 100 МГц. При данном значении опорной частоты преобразование цифровых значений DDS в аналоговый сигнал требует использования ЦАП-микросхемы с частотой обновления не менее 100 миллионов выборок в секунду. В пределах разрабатываемого устройства внедрено 14-разрядное двухканальное ЦАП с частотой обновления на уровне 125 миллионов выборок в секунду.

Основой аппаратного модуля является ПЛИС, которая осуществляет цифровой синтез прямоугольных, треугольных и синусоидальных сигналов. В процессе разработки ПЭС стоит сопоставить узлам функциональной схемы их электрические эквиваленты. В качестве контроллера универсальной шины используется микросхема FT245RL фирмы FTDI обеспечивающей подключение к ПЭВМ по шине USB версии 2.0. Основные характеристики микросхемы:

- тип моста/преобразование: *USB-FIFO*;
- встроенная память EEPROM: 1КБ;
- напряжение питания макс.: 5,5В;
- напряжение питания мин.: 3,3В;
- рабочая температура: - 40...85°C;
- корпус: *SSOP28*.

Микросхема FT245RL – однокристалльный преобразователь интерфейса USB на параллельный FIFO двунаправленной передачи данных. Весь протокол USB обрабатывается на чипе и не требует специальных прошивок. Преобразователь FT245RL обеспечивает скорость передачи данных до 8 Мбит/с. Кроме того, аппаратный мост USB-FIFO может быть реализован на современной микросхеме FT2232H.

FPGA Spartan-6 представляют собой ПЛИС шестого поколения, разработанные компанией Xilinx

и изготовленные с использованием 45-нанометровой технологии. Переход на этот технологический процесс позволил достичь оптимального сочетания стоимости, энергопотребления и производительности. Эти микросхемы являются продолжением линейки доступных ПЛИС с FPGA-архитектурой, выпускаемых компанией Xilinx.

Для обеспечения интерфейса между ПЛИС и контроллером универсальной последовательной шины (USB) используется 8-разрядная шина данных. Данные передаются с использованием асинхронной очереди FIFO. Для связи с ПЛИС используется 8 каналов передачи данных. Дополнительно имеются 2 канала для отправки сигналов управления, которые могут указывать на необходимость чтения (RD) или записи (WR), а также 2 канала для передачи информации о текущем статусе буферов: приемного (RXF) и передающего (TXE). На рисунке 5 представлена схема соединения ПЛИС с контроллером USB.

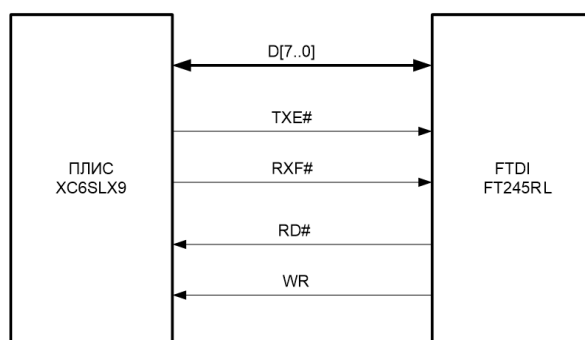


Рисунок 5 – Схема соединения ПЛИС с контроллером USB

Если RXF находится в состоянии лог. 0, то в буфере приема есть хотя бы один байт, т.е. компьютер уже что-то передал. Если в буфере приема есть хотя бы один байт, то для его считывания необходимо переключить сигнал RD с лог.1 в лог.0. Тогда один байт появится на выводах шины данных. Временные диаграммы цикла записи представлены на рисунке 6а. Если TXE находится в состоянии лог. 1, то буфер передачи заполнен полностью, т.е. перед тем, как передать компьютеру очередной байт необходимо

подождать, когда освободиться место в очереди. Для отправки данных в компьютер необходимо выставить байт на выводах шины и переключить сигнал *WR* с

лог.1 в лог.0. Временные диаграммы цикла записи представлены на рисунке 6б. В работе используется микросхема памяти *XCF04SVO20C*.

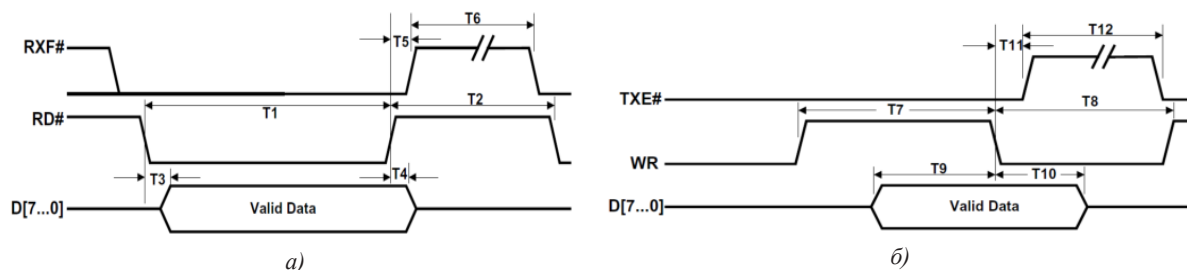


Рисунок 6 – Временные диаграммы цикла чтения (а) и цикла записи (б)

Одной из ключевых тенденций в современной фазе развития цифрового проектирования является применение языков описания аппаратуры высокого уровня. Среди них наиболее широко распространены *VHDL* и *Verilog*. В качестве основного средства описания разрабатываемых цифровых устройств на ПЛИС используется язык *VHDL*.

VHDL является *IEEE VHSIC* языком аппаратного описания и представляет собой очень мощный инструмент. *VHDL* специально приспособлен к проектированию схемы как на поведенческом, так и на переключательном уровнях. Хотя на *VHDL* можно создавать программное обеспечение общего назначения, это не является целью языка. Сама структура языка предполагает аппаратный проект. Каждая интегральная схема может быть описана на очень реалистичной основе, включая иерархический проект и проблемы синхронизации. Для использования *VHDL* имеется ряд причин:

- Неисправности схемы могут быть обнаружены на ранней стадии проектирования, до того, как будет выполнен топологический проект.
 - Существующие проекты можно использовать повторно.
 - Сложность электронных систем постоянно увеличивается. Скоро невозможно будет управлять такими огромными системами без помощи компьютера.
 - *VHDL* позволяет работать многим лицам с одной и той же схемой.
- Помимо этого, *VHDL* предлагает некоторые преимущества по сравнению с другими языками аппаратного описания.
- *VHDL* – общий стандарт и таким образом доступен для всех.
 - *VHDL* не зависит от используемой технологии или процесса.
 - *VHDL* поддерживает много различных методологий проектирования (например, проектирование сверху вниз, основанное на библиотеке восходящее проектирование, и т.д.).
 - *VHDL* не зависит от системы проектирования и поэтому полностью совместимо (по причине стандартизации).

Для эффективного обнаружения возможных ошибок на различных этапах разработки, включая создание исходных описаний на языке *HDL*, синтез, размещение и трассировку на кристалле, широко используется набор инструментов *Model-Sim*, разработанный компанией Model Technology. Такой подход способствует сокращению времени, необходимого для разработки устройств, и снижает стоимость процесса, поскольку ошибки, возникающие на более поздних этапах проектирования, могут сопровождаться более значительными затратами.

Разработка проекта осуществлялась в САПР *ISE Design Suite 14.7* и включает следующие файлы:

- *gen_mod.vhd*. Основной модуль верхнего уровня проекта, к порту которого привязываются соответствующие выводы ПЛИС. Модуль содержит блок кодирования биимпульсного сигнала, блок декодирования биимпульсного сигнала, контроллер блоков кодирования/декодирования и контроллер *USB-FIFO*.
- *ft245.vhd*. Модуль контроллера *USB-FIFO* содержит описание конечного автомата, реализующего взаимодействие с внешней микросхемой *FT245* по принципу *FIFO*.
- *dds.vhd*. Модуль, описывающий цифровую часть *IP*-ядра *DDS* генератора сигналов.
- *functab.vhd*. Таблица 14x13 формирует 13-рядный выходной код амплитуды, подаваемый на ЦАП.
- *testbench.vhd*. Испытательный стенд, представляющий собой специализированное *VHDL*-приложение, составляющее верхний уровень в иерархии модели. Этот софт управляет последовательностью сигналов, необходимой для верификации разрабатываемого устройства.

Ниже представлен фрагмент листинга *VHDL* описания порта модуля контроллера *USB-FIFO* (*ft245.vhd*), содержащего описание настроечных констант, задающих временные интервалы ожидания в циклах чтения и записи данных *FIFO*.

```
entity ft245 is
    generic (
        WRWAIT : natural := 3; -- wr active pulse width = 50 ns
```

```

WR2WRWAIT : natural := 3; -- wr to wr
pre-charge time = 50 ns
RDWAIT : natural := 3; -- rd active pulse
width = 50 ns
RD2RDWAIT : natural := 6 -- rd to rd
pre-charge time = 50 ns + 80 ns );
end entity ft245;
    
```

Модуль *IP*-ядра *DDS* генератора является реализацией схемы прямого цифрового синтеза, которая генерирует на выходе цифровые отсчеты

синусоидального сигнала с заданной частотой и фазой (регулируемые во время работы). Модуль имеет настроечные константы, задающие разрядность аккумулятора фазы (*WIDTH_G*), разрядность фазы (*PHASE_WIDTH*) и разрядность амплитуды (*AMPL_WIDTH*). При добавлении файла *functab.vhd* к проекту, разрядность фазы и амплитуды определяются из файла автоматически. На рисунке 7 показана блок-схема реализованного *DDS* генератора.

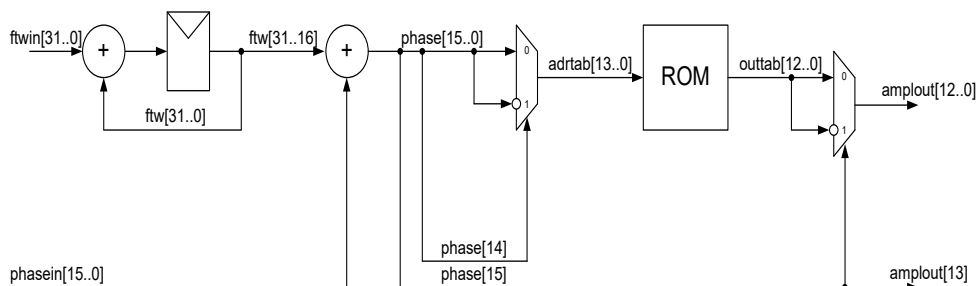


Рисунок 7 – Блок-схема *DDS* генератора

Сигналы опорной частоты и сброса на блок-схеме не показаны. Для синтеза треугольного и прямоугольного сигналов используются промежуточные значения шины *adrtab*[13..0]. Настраиваемые константы разрядности имеют значения (*WIDTH_G* = 32, *PHASE_WIDTH* = 16 и *AMPL_WIDTH* = 14). В *ROM* (файл *functab.vhd*) сохраняется только первый полупериод синусоиды. Два старших значащих бита фазового слова используются для управления инверсией входного значения и инверсией амплитуды выходного сигнала в соответствии с текущим квадрантом синусоиды. Расчет выходной частоты производится по следующему выражению:

$$F_{DDS} = \frac{F_{TW} \cdot F_{CLK}}{2^M} \quad (1)$$

где F_{DDS} – выходная частота,
 F_{CLK} – тактовая частота,
 F_{TW} – код частоты (*ftwin*),
 M – разрядность фазового аккумулятора (*WIDTH_G*).

Значение начальной фазы определяется в соот-

ветствии с выражением:

$$F_{DDS} = \frac{P_{DDS} \cdot F_{CLK}}{2^M}, \quad (2)$$

где P_{DDS} – начальная фаза,
 P_{TW} – фазовый код (*phasein*),
 N – фазовая разрядность (*PHASE_WIDTH*)

Моделирование работы устройства в программе ModelSim. Для верификации работы алгоритма устройства был спроектирован экспериментальный стенд, в архитектуре которого описано синтезируемое устройство. На входы этого устройства подаются тестирующие сигналы для проверки его функционала. В процессе проведения моделирования с установленной частотой синтезированного сигнала 1 кГц получены и представлены результаты в форме временных диаграмм в разделе (*View>Wave*). Общая длительность проведенного моделирования составляет 4 миллисекунды. На рисунке 8 показано изображение синусоидального сигнала.

Графическое представление прямоугольного и треугольного сигналов приведено на рисунках 9 и 10.

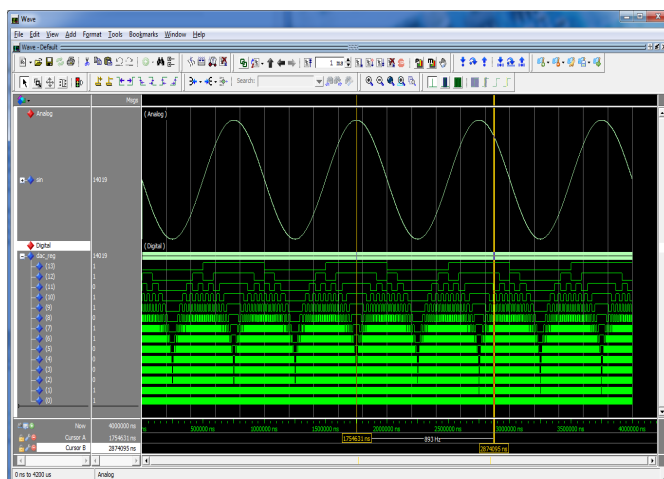


Рисунок 8 – Графическое представление синусоидального сигнала

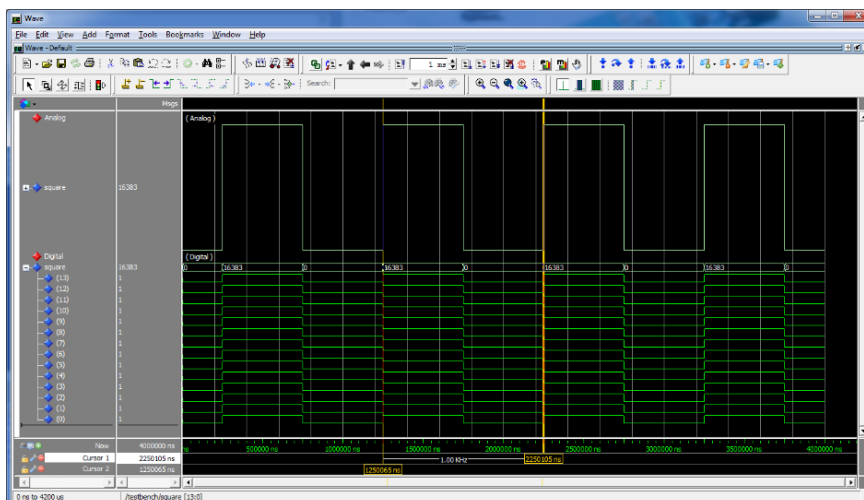


Рисунок 9 – Графическое представление прямоугольного сигнала

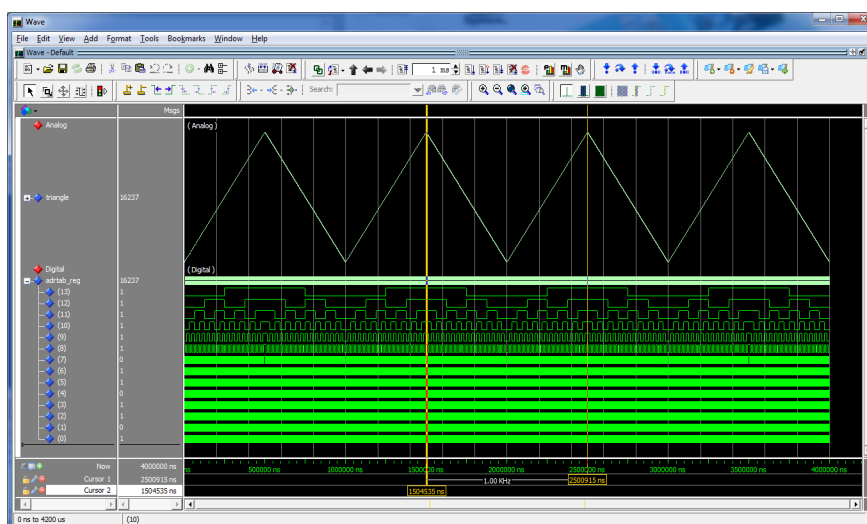


Рисунок 10 – Графическое представление треугольного сигнала

Представленные графические изображения отражают сигналы, разделенные на две основные группы. В первой группе, обозначенной как «Аналоговые», отображаются значения отсчетов, поступающих на аналоговый выход ЦАП. Этот визуальный аналоговый образ сигнала дает наглядное представление о том, каким будет синтезированный сигнал после прохождения ЦАП. На нижней части экрана отображается измеренная между «Маркером А» и «Маркером В» частота синтезируемого сигнала. Вторая группа сигналов, обозначенной как «Цифровые», содержит сигналы в виде раскрытой шины, где каждый разряд изображен как логический сигнал.

Обсуждение. Предложен вариант создания аппаратного модуля вычислительной системы для цифрового синтеза частоты на базе ПЛИС. Для практической реализации выбрана ПЛИС XC6SLX4 от компании Xilinx, обладающая достаточно высокой производительностью. Временные диаграммы работы устройства демонстрируют близость к результатам эмуляции на ПЭВМ, что подтверж-

дает возможность использования разработанного аппаратного модуля вычислительной системы для цифрового синтеза частоты на практике.

Выводы. В данном исследовании представлен вариант метода разработки аппаратного модуля для вычислительной системы, специализирующейся на цифровом синтезе частот, основанного на ПЛИС XC6SLX9 фирмы Xilinx. Этот аппаратный модуль разработан для генерации синусоидальных, прямоугольных и треугольных гармонических сигналов. Основная функция устройства заключается в выполнении прямого цифрового синтеза заданной частоты с помощью ПЛИС и передаче данных на цифро-аналоговый преобразователь. Управление устройством осуществляется с помощью персонального компьютера, через аппаратный мост USB-FIFO по стандарту USB 2.0.

Созданный аппаратный модуль может найти применение в качестве: источника опорного сигнала для генераторов с петлей фазовой автоподстройки частоты; прямого синтеза радиосигналов; тактового генератора в промышленном оборудовании и меди-

цинских системах; генератора звуковых частот и т.п.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Шилдт Герберт С++ для начинающих. Серия «Шаг за шагом» / Шилдт Г.; пер. с англ. – М.: ЭКОМ Паблишерз, 2022. – 640 с.
2. Максфилд К. Проектирование на ПЛИС: Архитектура, средства и методы. Курс молодого бойца – М.: Додэка-XXI, 2007. – 408 с. (Серия «Программируемые системы»).
3. Сухачев К.И., Особенности проектирования цифровой электроники на базе программируемой логики: учебное пособие / К.И. Сухачев, Д.В. Родин, А.С. Дорофеев. – Самара: Издательство Самарского университета, 2022. – 200 с.
4. Ушенина И.В. Проектирование цифровых устройств на ПЛИС: учебное пособие. – Лань, 2019. – 406 с.
5. Антонов А.А., Барабанов А.В., Данчек Ч.Т., Жельнио С.Л., Иванец С.А., Кудрявцев И.А., Панчул Ю.В., Романов А.Ю., Романова И.И., Телятников А.А., Шуплецов М.С. Цифровой синтез: практический курс / под общ. ред. А. Ю. Романова, Ю. В. Панчула. – М.: ДМК Пресс, 2020. – 556 с.
6. Тарасов И.Е. Разработка цифровых устройств на основе ПЛИС фирмы Xilinx с применением языка VHDL. – М.: Горячая Линия-Телеком, 2021. – 252 с.
7. Климович А., Соловьев В.В. Логическое проектирование цифровых систем на основе программируемых логических интегральных схем. – М.: Горячая Линия-Телеком, 2021. – 376 с.
8. Наваби З. Проектирование встраиваемых систем на ПЛИС. – М.: ДМК Пресс, 2016. – 464 с.
9. Зотов В.Ю. Проектирование встраиваемых микропроцессорных систем на основе ПЛИС фирмы XILINX. Современная электроника. Горячая линия-Телеком, 2-е издание, стереотипное, 2017. – 519 с.
10. Соловьев В.В. Архитектуры ПЛИС фирмы Xilinx: CPLD и FPGA 7-й серии. – М.: Горячая Линия – Телеком, 2021. – 392 с.
11. Петров С. Шины PCI, PCI Express. Архитектура, дизайн, принципы функционирования. Серия: Аппаратные средства, БХВ-Петербург, 2006. – 416 с.
12. Сергиенко А. М. VHDL для проектирования вычислительных устройств: ЧП «Корнейчук», ООО «ТИД ДС», 2003. 208 с.
13. Тарасов И.Е. ПЛИС Xilinx. Языки описания аппаратуры VHDL и Verilog, САПР, приемы проектирования. – М.: Горячая Линия-Телеком, 2022. – 538 с.
14. Бруно Ф. Программирование FPGA для начинающих. – М.: ДМК Пресс, 2022. – 304 с.
15. Кнышев Д.А., Кузелин М.О. ПЛИС фирмы "XILINX": описание структуры основных семейств. – М.: ДМК Пресс, 2018. – 238 с.
16. Кочетков В.В., Зобнин Б.Б. Проблемы и перспективы использования микроконтроллеров в АСУ ТП // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2019. – № 11. – С. 81-85.
17. Мотало Р.В., Брагин А.Н. Импортзамещение на рынке электронных компонентов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 1. – С. 27-29.
18. Субботин Н.Ю., Селиванов К.В. Анализ перспектив применения интерфейса USB // Технологии инженерных и информационных систем. – 2021. – № 4. – С. 60-69.
19. Соловьев В.В. Временной анализ программируемых логических интегральных схем. – М.: Горячая Линия-Телеком, 2023. – 360 с.
20. Вальпа О.Д. Полезные схемы с применением микроконтроллеров и ПЛИС. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 416 с.
21. Сухоруков С.И. Цифровой синтезатор сигналов заданной формы на базе ПЛИС // Информационные технологии в экономических и технических задачах. Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. – 2016. – С. 290-293.

Статья поступила в редакцию 03.10.2023

Статья принята к публикации 15.12.2023

УДК 004.855.5.

EDN: LTGXIC

АНАЛИЗ И ВЫБОР МЕТОДА КЛАСТЕРИЗАЦИИ ДЛЯ ТЕКСТОВЫХ ДОКУМЕНТОВ КОРОТКОЙ ДЛИНЫ С ЦЕЛЬЮ РЕАЛИЗАЦИИ В МОДУЛЕ РЕКОМЕНДАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ВУЗА

© Автор 2023

SPIN: 2321-3879

ORCID: 0009-0006-3530-5703

ПОПОВА Ольга Александровна, преподаватель кафедры

«Медицинской информатики и биологической физики»

Тюменский государственный медицинский университет

(625013, Россия, Тюмень, улица Одесская, 54, e-mail: PopovaOA@tyumsmu.ru)

Аннотация. С появлением в системе образования индивидуальных образовательных траекторий (ИОТ), любой ВУЗ сталкивается с проблемой корректной подачи персонализированного обучающего материала для студентов. Таким образом, для облегчения выбора обучающего материала для студента, возникает необходимость автоматизации и разработки рекомендательных систем под конкретные нужды. В работе рассматривается проблема поиска эффективного метода кластеризации текстовых данных короткой длины без явного указания количества кластеров для разработки системы интеллектуального анализа и поиска текстов на естественном языке, как одного из модулей рекомендательной системы, в частности системы поддержки принятия решений (СППР). В статье представлено описание самых популярных методов кластеризации, применимых для кластеризации текстовых данных без явного указания кластеров, проведено изучение и анализ методов применительно к набору текстовых данных короткой длины (средняя длина одного документа 100 слов), представленных аннотациями к обучающим дисциплинам из различных областей знаний. Текстовые данные представлены ИОТ двух разных по специализации вузов города (Мультипрофильного вуза, далее ТюмГУ и медицинского вуза, далее ТюмГМУ) и проведен сравнительный анализ работы методов. Был сделан вывод работы методов на основе зависимости специфики образовательного контента двух разных по обучающей направленности вузов. В ходе эксперимента были изучены и проанализированы методы: *DBSCAN*, *OPTICS*, распространение близости, агломеративная кластеризация, *BIRCH*. Эмпирическим путем была доказана успешность применения агломеративной кластеризации: алгоритм сгруппировал тексты по кластерам с лучшей оценкой точности по схожести в одном кластере. В работе приведены графики разбиения текстовых данных по кластерам, проведен анализ и обоснование примененных методов предобработки текстовых данных и выбора метода кластеризации. Подведен итог и даны рекомендации по применению алгоритмов кластеризации к задаче интеллектуального анализа текстов при реализации модуля СППР.

Ключевые слова: кластеризация, оценка качества кластеризации, текстовые данные, *NLP*, *TF-IDF*, *DBSCAN*, *OPTICS*, распространение близости, агломеративная кластеризация, *BIRCH*, метод *k*-средних.

ANALYSIS AND SELECTION OF A METHOD OF CLUSTERIZATION OF SHORT LENGTH TEXT DOCUMENTS FOR IMPLEMENTATION IN THE UNIVERSITY RECOMMENDER SYSTEM MODULE

© The Author 2023

ORCID: 0009-0006-3530-5703

POPOVA Olga Aleksandrovna, teacher of the Department of Medical Informatics and Biological Physics

Tyumen State Medical University

(625013, Russia, Tyumen, Odesskaya street, 54, e-mail: PopovaOA@tyumsmu.ru)

Abstract. With the advent of individual educational trajectories (IET) in the education system, any university is faced with the problem of correctly presenting personalized educational material to students. Thus, to facilitate the selection of educational material for a student, there is a need for automation and development of recommendation systems for specific needs. The paper examines the problem of finding an effective method for clustering short-length text data without explicitly indicating the number of clusters for developing a system for mining and searching for texts in natural language, as one of the modules of a recommender system, in particular a decision support system (DSS). The article presents a description of the most popular clustering methods applicable for clustering text data without explicitly specifying clusters, studies and analyzes the methods in relation to a set of short-length text data (the average length of one document is 100 words), represented by annotations to educational disciplines from various fields of knowledge. Text data is presented by the IOT of two different specialization universities of the city (Multidisciplinary University, hereinafter Tyumen State University and a medical university, hereinafter Tyumen State Medical University) and a comparative analysis of the work of the methods was carried out. A conclusion was drawn about the operation of the methods based on the dependence of the specifics of the educational content of two universities with different educational orientations. During the experiment, the following methods were studied and analyzed: *DBSCAN*, *OPTICS*, proximity propagation, agglomerative clustering, *BIRCH*. The success of using agglomerative clustering was empirically proven: the algorithm grouped texts into clusters with the best accuracy score based on similarity in one cluster. The work presents graphs for dividing text data into clusters, analyzes and substantiates the applied methods of preprocessing text data

and choosing a clustering method. The results are summarized and recommendations are given on the application of clustering algorithms to the problem of text mining when implementing the DSS module.

Keywords: clustering, clustering quality assessment, text data, *NLP*, *TF-IDF*, *DBSCAN*, *OPTICS*, *Affinity Propagation*, Agglomerative clustering, *BIRCH*, *k-means* method.

Для цитирования: Попова О.А. Анализ и выбор метода кластеризации для текстовых документов короткой длины с целью реализации в модуле рекомендательной системы ВУЗа / О.А. Попова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 12. – № 4(64). – С. 89-102. – EDN: LTGXIC.

Введение. Благодаря тенденции активного внедрения в систему высшего образования индивидуальных образовательных траектории (ИОТ) ВУЗы России перешли на новый уровень подачи образования. Благодаря персонализированной подаче образовательного материала у студентов формируется осознанность выбора профессионального пути, вырабатывается интерес к саморазвитию, таким образом студент растёт как профессионал и как личность, повышая свою конкурентоспособность в глазах работодателя. И таким образом становится достаточно проблематично правильно, точно и быстро сориентировать обучающегося в огромном потоке информации образовательного контента, который ВУЗы могут предложить. На сегодняшний момент, каждый ВУЗ России имеет широкие возможности применения интеллектуальных систем поддержки принятия решений (СППР) и интеграцию их в систему автоматизированного управления ВУЗом. В настоящем времени в вузах страны широко используются такие программные продукты как: «1С: Университет» [1], «Тандем. Университет» [2], «Магеллан» [3]. Преимуществом продукта компании 1С является поддержка многопользовательского режима работы посредством использования браузеров, а также возможность интеграции с другими продуктами компании 1С. «Тандем. Университет», предлагает возможность использовать открытый исходный код и настройки под индивидуальные запросы вуза. Программный продукт «Магеллан» имеет много гибких настроек, под нужды вуза с возможностью корректировки даже печатных форм. Вместе с ростом и развитием вуза изменяется и модернизируется и цифровая среда вуза, добавляются новые модули, расширяются возможности. Таким образом, внедрение системы поддержки принятия решений становится неизбежным этапом для дальнейшего развития системы управления образовательным процессом. Впервые термин «системы поддержки принятия решений» был введен в 1971 году А. Горри и М. С. Скотт-Мортон [4], которые официально назвали системы, работающие с частично структурированными и неструктурированными решениями – СППР. При проектировании СППР одна из существенных проблем является получение информации при условии неточности и неопределенности неструктурированных данных. В частности, задачу выбора эффективного метода организации неструктурированных данных решает интеллектуальный анализ текстовых данных, целью

которого является определение тематической информации и выявления неявных закономерностей текстовых данных при учете синтаксических особенностей языка.

В работах авторов по *NLP* (обработка естественного языка, *natural language processing, NLP*) представлено описание искусственного интеллекта и лингвистики, а также основные уровни обработки естественного языка [5, 6], что позволяет использовать для запросов к данным тексты или устные высказывания на естественном языке. Данная технология искусственного интеллекта широко используется при разработке виртуальных помощников, а также в поисковых системах, при фильтрации спама в электронной почте, при автоматическом переводе на *web*-странице пользователя, а также в системах поддержки принятия решений. При разработке СППР и поисковых систем интеллектуальный анализ реализуется, в частности, с помощью нечеткой логики, нейронных сетей, генетических алгоритмов и кластеризации. Применяются эти математические и программные инструменты в различных комбинациях или самостоятельно. В работе рассматривается один из инструментов неконтролируемого машинного обучения – кластеризация. Термин «кластерный анализ» первым в употребление ввёл американский психолог из университета Беркли Роберт Трайон (Robert C. Tryon) в 1939, среди современных исследователей можно отметить труды Миркина [7], в них автор подробнейшим образом описывает систематизацию по видам данных, видам кластерных структур, видам критериев и методов кластер-анализа. Так, в работе Пархоменко и Григорьев 2017 года [8], описывают экспериментальные исследования методов кластеризации текстовых документов, в том числе, научных статей. Каждый метод состоял из трех последовательных этапов: предварительная обработка текста; векторизация предобработанного текста; кластеризация векторов. Их экспериментальное исследование показало, что лучшим методом (при условии оптимизации параметров с помощью внутренней меры эффективности) является *k-means* с векторизацией *Paragraph Vectors* для всех наборов данных; кроме *Krapivin*, для которого лучше оказалась агломеративная кластеризация. Подобные результаты были получены в работе Поповой и Даниловой [9], где рассматривалась проблема кластеризации текстовых данных короткой длины (аннотаций к научным публикациям в режиме реального времени, в системах, осуществляющих

поиск по базам научных публикаций. В их исследовании был применен расширенный список стоп-слов, а также информация о частях речи лексем, где для представления документов применялся словарь, содержащий не все слова коллекции, а только существительные и прилагательные, или словарь, состоящий из последовательностей существительных и прилагательных. Использованы были так же два базовых алгоритма кластеризации: *k-means* и иерархическая кластеризация (метод межгруппового среднего). В результате их работы было показано, что использование расширенного списка стоп-слов и представление документов на основе существительных и прилагательных из словаря коллекции позволяют улучшить качество и скорость работы алгоритма *k-means*. Для метода межгруппового среднего в аналогичном случае может наблюдаться ухудшение качества кластеризации. В работе Etrecalde M., Ingaramo D., Rosso для решение этой проблемы был предложен подход на основе *AntiTree*, он объединяет информацию об коэффициенте силуэта и концепции привлекательности кластера на разных этапах процесса кластеризации, подобная концепция была улучшена в следующих их работах, где авторы предложили алгоритм *ITSA* (это итеративная версия алгоритма *PAntSA*) [10, 11]. Подобная концепция оптимизации кластеризации была описана в работе [12], в ней авторы оптимизировали произвольную целевую функцию, используя два неконтролируемых показателя достоверности кластера и показатель ожидаемой плотности, и коэффициент глобального силуэта. Несмотря на большое количество работ посвященных разработке, усовершенствованию и изучению методов кластеризации, применимых к коротким текстам (средний размер документа в корпусе 100 слов), проблема качества кластеризации коротких текстов остается открытой.

Ссылаясь на лекции профессора Воронцова: «не существует однозначно наилучшего критерия качества кластеризации, результат кластеризации существенно зависит от метрики ρ , выбор которой, как правило, также субъективен и определяется экспертом» [13]. Таким образом, возникает необходимость в мнении эксперта для неконтролируемых алгоритмов кластеризации. Данная проблема рассматривается в статье Дударина [14, 41], где автор использует подход на базе нейронных сетей, позволяющий итеративно учитывать обратную связь без корректировки пространства признаков до 85%.

Хотя все авторы из приведенных работ внесли огромный вклад в улучшения качества кластеризации и смогли повысить процент чистоты кластеризации, проблема оптимизации кластеризации и апробировании каждого метода для конкретных данных будет еще долго актуальна. Несмотря на многообразие работ, посвященных проблемам кластеризации текстовых данных короткой длины, нам не удалось найти статьи, которые были бы

посвящены анализу текстов рабочих программ и/или обучающих курсов, в рамках ИОТ, методами кластеризации. Так же не проводилось исследований содержания этих программ в зависимости от образовательной специфики вуза. Мы предполагаем, что применение неконтролируемого метода машинного обучения (кластеризации) может быть весьма перспективным и быть использовано в части разработки модуля рекомендательной системы вуза, так как у студентов при выборе образовательных траекторий появится возможность опираться не на субъективный человеческий опыт, который может быть зачастую ошибочными, а на результаты работы алгоритмов машинного обучения согласно указанным личным предпочтениям, что и обусловило постановку цели нашей работы.

Целью работы является поиск эффективного неконтролируемого метода машинного обучения для интеллектуального анализа коротких текстов различной тематики, с дальнейшей реализацией в модуле рекомендательной системы вуза. Задача работы заключается в изучении, апробировании и анализе существующих методов кластеризации, без явного указания количества кластеров для текстовых данных короткой длины (средняя длина аннотации 100 слов), представленных аннотациями к различным обучающим дисциплинам, их сравнение и анализ полученных результатов, применительно к двум наборам данных рабочих программ двух разных по специфике обучения вузов.

Методология. Массив исследуемых данных представлен двумя наборами обучающих курсов (ИОТ) из различных областей знаний, двух разных по профилю обучения вузов города: мультипрофильного вуза (далее ТюмГУ) и узкоспециализированного вуза (далее ТюмГМУ). Объем каждого набора составляет 207 текстов короткой длины (средняя длина одного документа 100 слов), представляющих собой аннотации к обучающим дисциплинам, предлагаемых студенту на выбор.

Для того чтобы работать с моделями кластеризации, согласно существующим алгоритмам, текстовые данные подвергаются особой предварительной обработке. Обработка естественного языка (*Natural Language Processing, NLP*) представляет собой синтез искусственного интеллекта и математической лингвистики, целью которого является создание человек понятного взаимодействия между машиной и человеком. Так как предложения в текстах на естественном языке весьма избыточны, и содержат помимо слов цифры, ссылки, предлоги, знаки пунктуации, а также сами являются производными базовой формы слов (имеют окончания, суффиксы), то это является очень сложным для обработки с помощью программных средств. Первым этапом в предобработке производят нормализацию текста, которая включает в себя: приведение текста в нижний регистр, удаление часто встречающихся слов (стоп-слов), удаление пунктуации, символов, цифр,

знаков переноса, табуляции, ссылок. Следующим этапом слова делят на токены (по количеству слов в предложении), далее для сокращения морфологически похожих токенов в документе используют лемметизацию (приведение каждой части речи в начальную форму), стемметизацию (удаление суффиксов и приведение слова к корневой основе). Для реализации работы был выбран объектно-ориентированный язык программирования *Python*, так как данный язык программирования поддерживает большинство библиотек для работы с текстами на естественном языке и широко используется в машинном обучении для профессионального анализа больших данных. В работе на этапе предобработки текста были использованы различные библиотеки в среде программирования *Python*: для подготовки данных и их структурирования была использована библиотека *Pandas* она помогает собрать и приготовить данные для последующей их обработки; морфологическая библиотека для обработки естественного языка – *NLTK (natural language toolkit)*, данная библиотека предоставляет инструменты для удаления стоп-слов, леммитизации, стемминга и токенизации текста, а также модули *RE (регулярных выражений)* для очистки текста, для приведения текста в нижний регистр использовался встроенный метод *lower()*.

Последний этап подготовки текста для задачи кластеризации включает в себя преобразование коллекций текстовых документов в векторное представление. Для этой цели в работе был использован метод *TF-IDF* [15].

Метод *TF-IDF* основан на отношении частотной составляющей токена в документе и инверсии его частоты к общему числу токенов в документах коллекции. Показателем метода является вес слова в документе: маленький вес свидетельствует о высокой частоте встречаемости слова и отсутствии отличительного признака. Данный статический показатель весьма популярен в поисковых системах при поиске релевантности текстового контента и в задачах группировки документов по схожести текстов.

$$TF_{token_i} = \frac{n_i}{N_i}$$

$$IDF_{token} = \log \frac{P}{p}$$

$$TF - IDF = TF \times IDF,$$

где n_i – количество вхождений токена в i -ом документе,

N – общее количество токенов в i -ом документе,

p – количество документов, в которых встречается токен,

P – общее количество документов,

TF-IDF – это произведение *TF* на *IDF*.

Данным методом векторизации прост и удобен в исполнении для задач интеллектуального поиска, но имеет 2 весомые проблемы: проблема размерности векторного пространства (модели текстовых данных характеризуется высокой размерностью

и разреженностью семантических признаков, что требует дополнительной предобработки) и проблемы учитывания семантики и порядка следования слов [16]. В работе были учтены данные особенности метода: был использован метод *SVD*, который позволяет уменьшать линейную размерность с помощью усеченного сингулярного разложения, тем самым повышая точность модели.

Таким образом, понижение размерности векторного пространства (матрицы) – это преобразование данных большой размерности в такое пространство пониженной размерности, в которой не теряется информация, заключенная в исходных данных. Метод *SVD* – это декомпозиция вещественной матрицы A с целью ее приведения к каноническому виду по формуле

$$A_{n \times m} = U_{n \times n} \times \Sigma_{n \times m} \times V_{m \times m}^T$$

где U – ортогональная матрица,

Σ – диагональная матрица размером, элементы которой по главной диагонали являются сингулярными значениями A , расположенными в порядке убывания,

V – ортогональная матрица.

Результатом работы алгоритма *SVD* будет матрица слово-документ, далее вычисляется подобие каждой пары документов (в векторном пространстве) используя косинусную меру подобия. Её значения находятся в интервале $[0, 1]$ и не зависят от абсолютных значений исходной матрицы. Косинусная мера выражается формулой

$$\cos(\theta) = \frac{A \cdot B}{|A| \cdot |B|} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i B_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n B_i^2}}$$

где A_i и B_i – компоненты векторов частоты термина документа соответственно.

Косинусное сходство двух документов будет находиться в диапазоне от 0 до 1, поскольку частота терминов (с использованием весов *tf-idf*) не может быть отрицательным. Таким образом, чем ближе значение к 1, тем больше похожи документы. При программной реализации работы в среде программирования *Python* для задачи векторизации была использована библиотека *Scikit-learn*, она реализует метод *TF-IDF* в двух классах: *TfidfTransformer*, который принимает выходные данные разреженной матрицы, созданные *CountVectorizer*, и преобразует их, и *TfidfVectorizer*, который принимает текстовые данные и выполняет как извлечение функций из пакета слов, так и преобразование *TF-IDF* [17], *Scikit-learn* библиотека также реализует метод *SVD*, используемый для уменьшения линейной размерности посредством усеченного разложения по сингулярным значениям [18, 19].

После подготовки данных и предварительной обработки модель может быть подана на вход алгоритму кластеризации.

Кластеризация данных представляет собой задачу разбиения множества объектов на подмножества, называемые кластерами. Внутри каждого кластера

должны оказаться «похожие» объекты, а объекты разных групп должны максимально отличаться.

Классификация алгоритмов кластеризации по типу формирования кластеров широко представлена во многих научных работах [20-22], суть которых заключается в изучении, сравнении и дифференциации алгоритмов кластеризации. Итак, основной механизм кластеризации – это непрерывное изменение конфигурации кластера с вычислением меры сходства между объектами до момента нахождения эффективного результата.

Описание методов кластеризации. Характерная особенность, затрудняющая выполнение неконтролируемого машинного обучения, в задаче кластерного анализа текстовых данных является наличие данных очень высокой размерности, что обусловлено большим наличием признаков. В итоге подбор методов кластеризации текста сводится к выбору тех методов, которые могут работать с большим пространством признаков и не нуждаются в явном указании количества кластеров [23-27].

Подобными свойствами обладают следующие методы кластеризации: *Affinity Propagation* (распространение близости), *DBSCAN*, *OPTICS*, агломеративная кластеризация, *BIRCH*.

Метод распространения близости (*Affinity Propagation*) определяет меру сходства между двумя точками посредством «обмена сообщениями» между объектами выборки и оценки, насколько один объект может служить центром или представителем для другого. Обмен сообщениями задается с помощью матрицы ответственности (оценивает возможность объекта быть представителем) и матрицы доступности (оценивает, насколько объект подходит для того, чтобы быть представителем). В качестве входных данных алгоритм получает матрицу сходства, диагональные значения которой являются вероятностной оценкой центра кластера. Алгоритм работает путем итеративного обновления матриц ответственности и доступности (*responsibility* и *availability*). Когда обе матрицы после их сочетания перестают обновляться, алгоритм завершает работу. В результате выбираются окончательные экземпляры, и происходит окончательная кластеризация [28, 29].

$$\begin{aligned} s(i, j) &> s(i, k), \\ s(i, k) &= -\|x_i - x_k\|^2, \\ r(i, k) &\leftarrow s(i, k) - \max_{k' \neq k} \{a(i, k') + s(i, k')\}, \\ a(i, k) &\leftarrow \min(0, r(k, k) + \sum_{i' \in \{i, k\}} \max(0, r(i', k))) \\ a(k, k) &\leftarrow \sum_{i' \neq k} \max(0, r(i', k)) \\ (r(i, i) + a(i, i)) &> 0, \end{aligned}$$

где s – функция, которая количественно определяет сходство между любыми двумя точками данных, $r(i, k)$ – значения матрицы ответственности, количественно определяют насколько хорошо x_k

может служить образцом для x_i ,

$a(i, k)$ – значения матрицы доступности, показывают насколько для x_i образец x_k подходит в качестве своего образца, принимая во внимание предпочтения других точек для x_k в качестве образца.

DBSCAN – это неиерархический плотностной алгоритм, основанный на концепции плотных областей объектов для формирования кластера данных [30]. Алгоритм начинает работу от любого вектора x в метрическом пространстве признаков определяя радиус (эпсилон-окрестность – расстояние от x равно значению ϵ), представлено по формуле (1).

В алгоритме на основании эпсилон-окрестности предварительно формируются три кластера: корневой (содержащий не менее n объектов), граничный (в окрестности корневого, но не корневого), шумовой (не вошедший в радиус корневого и граничного). Алгоритм случайным образом выбирает x объект из набора данных, далее алгоритм определяет наличие других объектов в эпсилон-окрестности по формуле (2), если их меньше n , то объект помечается как условлено шумовой. Далее алгоритм случайным образом находит следующий объект, не затрагивая ранее помеченные, и опять сравнивает их количество с установленным параметром эпсилон-окрестности, если в этой области находятся не менее n других объектов, то объект помечается как корневой, действия рекуррентно повторяются для всех объектов, входящих в эту эпсилон-окрестность, таким образом создается новый кластер (K). Объекты, не отнесенные ни к одному кластеру, помечаются как шум.

$$U_\epsilon(x) = \{u \in U: \rho(x, u) \leq \epsilon\} \quad (1),$$

где (ρ, u) – выбранная метрика пространства признаков (например, евклидово расстояние),

$\epsilon > 0$ – выбирается эмпирически,

$$|U_\epsilon(x)| \geq n \quad (2).$$

OPTICS – это так же плотностной алгоритм, но, в отличие от *DBSCAN*, относительно нечувствителен к настройкам параметров: он строит граф расстояния достижимости, присваивая каждому образцу как расстояние, так и место в атрибуте кластера. В отличие от *DBSCAN*, *OPTICS* также учитывает точки, которые являются частью более плотно упакованного кластера, поэтому каждой точке назначается основное расстояние, которое описывает расстояние до ближайшей точки *MinPts*,

$$|N_\epsilon(p)| < MinPts,$$

где ϵ – максимальное расстояние,

MinPts – количество точек для формирования кластера,

p – базовая точка, в эпсилон-окрестности.

OPTICS [31] метод позволяют извлекать кластеры с переменной плотностью в одном наборе данных.

Агломеративная кластеризация (*Agglomerative clustering*) является иерархическим типом кластеризации (работает по принципу «снизу-вверх»), основанным на группировке объектов по степени их сходства. Алгоритм начинает работу, рассматривая каждый объект как центр одного

кластера, впоследствии объединяя пары кластеров на основе критерия связности. Процесс слияния будет повторяться до тех пор, пока все данные в исходном наборе не будут связаны вместе в иерархическом дереве [32-35].

На каждой итерации объединяются кластеры, разделенные кратчайшим расстоянием (кластеризация ближайших соседей), функция связи для определения расстояния между кластерами представлена формулой (3).

$$D(X, Y) = \min_{x \in X, y \in Y} d(x, y), \quad (3)$$

Где X, Y – это два набора элементов, рассматриваемых как кластеры,

$d(x, y)$ – расстояние между двумя элементами x и y .

Существует достаточно много видов функций связи (кластеризация с полной связью, кластеризация с минимальной дисперсией Уорда, кластеризация средневзвешенных связей и другие) и выбор той иной метрики связи влияет на форму кластеров. Например, полная связь имеет тенденцию образовывать больше сферических кластеров, чем одинарная связь. Большинство методов расчета расстояния можно представить в виде единой формулы, предложенной Г. Лансом и У. Уильямсом в 1983 году (4) [48]

$$R(B \cup F, S) = \alpha_B R(B, S) + \alpha_F R(F, S) + \beta(B, F) + \gamma |R(B, S) - R(F, S)|,$$

где $B \cup F$ – кластер, сформированный слиянием двух кластеров на предшествующей итерации,

S – кластер, к которому необходимо рассчитать расстояние,

$\alpha_B, \alpha_F, \beta, \gamma$ – коэффициенты, определяющие разные функции расстояний.

На практике в большинстве случаев используются функции полной связи и функция минимальной дисперсии расстояний (Уорда).

BIRCH – является иерархическим алгоритмом, механизм работы, которого реализуется по принципу «сверху вниз» (дивизионный алгоритм иерархической кластеризации). Он также строит древовидную структуру данных (*CFT*). Данные сжимаются с потерями до набора узлов *Clustering Feature* (ФК – функция кластеризации) (*CF Nodes*). Узлы *CF* имеют ряд подкластеров (подкластеры *CF*), и эти подкластеры *CF*, расположенные в нетерминальных узлах *CF*, могут иметь узлы *CF* в качестве дочерних (рис. 6). *BIRCH* имеет два основных параметра: порог (*threshold*), ограничивающий получение требуемого количества первичных кластеров, и фактор ветвления (*branching*), ограничивающий максимальное количество подкластеров *CF* в каждом узле. *BIRCH* предусматривает двухступенчатую кластеризацию, работа при минимальных затратах памяти, возможность работы при единственном сканировании набора данных, принятие во внимание неравномерной распределённости данных по пространству, обработка области с высокой плотностью как один кластер. Однако алгоритм нуждается в задании пороговых значений, выделение кластеров только сферической формы [36, 37]. Метод *BIRCH* разбит на 4 фазы. Первая фаза строит

CF дерево данных (набор N d -мерных точек данных), где признак набора определяется как тройка $CF = (N, LS, SS)$, при

$$\vec{LS} = \sum_{i=1}^N \vec{X}_i,$$

$$\vec{SS} = \sum_{i=1}^N (\vec{X}_i)^2,$$

где LS – линейная сумма точек данных,

SS – сумма квадратов точек данных,

N – количество точек данных, входящих в кластер

$$\vec{C} = \frac{\sum_{i=1}^N \vec{X}_i}{N} = \frac{\vec{LS}}{N},$$

$$R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\vec{X}_i - \vec{C})^2}{N}} = \sqrt{\frac{N \cdot \vec{C}^2 + \vec{SS} - 2 \cdot \vec{C} \cdot \vec{LS}}{N}},$$

$$D = \sqrt{\frac{N_1 \cdot \vec{SS}_2 + N_2 \cdot \vec{SS}_1 - 2 \cdot \vec{LS}_1 \cdot \vec{LS}_2}{N_1 \cdot N_2}},$$

где C – центроид кластера,

R – радиус кластера,

D – среднее расстояние между кластерами.

Построение кластерного дерева (*CF*), зависящее от двух параметров: B – коэффициента разветвления, T – пороговой величины, алгоритм работы метода представлен на рисунке 6. Каждый нелистьевой узел дерева может иметь не больше чем B вхождений узлов представленной формы: [$CF_i, Child_i$], где $i = 1, 2, \dots, B$; $Child_i$ – указатель на i -й дочерний узел [51]. Где каждый листовый узел имеет связь с двумя соседними узлами и каждый кластер имеет свой диаметр не более пороговой величины T .

На второй фазе алгоритм перестраивает кластерное дерево в меньшее дерево, путем удаления кластерных ветвей и группирования переполненных подклассов в большие подклассы (необязательная фаза).

На третьей фазе применяется алгоритм для кластеризации всех листьев. Далее применяется агломерирующий иерархический алгоритм кластеризации непосредственно к подкластерам, представленным их *CF*-векторами. Таким образом получаем набор кластеров, которые содержат главные схемы распределения данных. Локальные неточности, полученные на 3 фазе, исправляются на 4 фазе. Центроиды кластеров, полученных в 3 фазе, используются как центры и точки перераспределения точек данных для получения нового набора кластеров. Четвертая фаза обеспечивает удаления выбросов.

Результаты. Методы оценки точности кластеризации были выбраны исходя из того, что нам неизвестна истинная принадлежность объектов к какому-либо кластеру, и проанализированная с помощью коэффициента Силуэта (учитывает среднее расстояние внутри кластера и среднее значение до ближайшего кластера, для каждого объекта данных),

коэффициента Дэвиса-Булдина (схожесть между кластерами к размеру самих кластеров), коэффициента Калински-Харабаша (отношение суммы дисперсии между кластерами и дисперсии внутри кластера для всех кластеров).

Метод *Affinity Propagation* сгруппировал документы в наборах данных (ТюмГМУ и ТюмГУ) по 40 кластеров в каждом, со средним значением документов в кластере – 5, результаты представлены в таблице 2. При изменении гиперпараметров данные незначительно менялись, для нормализации и снижения числовых колебаний при обновлении сообщения был выбран параметр: $damping=0.7$, количество итераций без изменений числа предполагаемых кластеров: $convergence_iter=15$. В зависимости от состава данных (набор ТюмГМУ и набор ТюмГУ) метод распространения близости распределил дисциплины с разной оценкой точности кластеризации. При подаче на вход разреженной матрицы ТюмГМУ оценка точности кластеризации с помощью коэффициента силуэта ($metric="euclidean"$) составила 0,19, в наборе данных ТюмГУ – 0,023. При использовании инструментов предобработки данных для уменьшения числа признаков (усеченного разложения по сингулярным числам, с метрикой " $squeuclidean$ ") – 0,49 в наборе ТюмГМУ и 0,36 в наборе ТюмГУ. При использовании инструмента поиска графа ближайших соседей (с метрикой " $squeuclidean$ ") – 0,7 в наборе ТюмГМУ и 0,5 в наборе ТюмГУ. Графики разбиения текстовых данных методом распространения близости для двух наборов данных представлены на рисунке 1, график линейной зависимости

качества кластеризации от степени реализации методов предобработки текстовых данных для уменьшения числа признаков представлена на рисунке 2. Алгоритм хорошо работает с небольшими данными, но нуждается в предварительной настройке параметров, т. к. имеет вычислительную сложность и сложность пространства признаков: в работе пришлось использовать дополнительные библиотеки предобработки данных для уменьшения числа признаков и поиска графа ближайших соседей, а также настройку максимального количества итераций, т. к. алгоритм имеет тенденцию образовывать много небольших и близких по содержанию кластеров, создавая при этом один или два перенасыщенных крупных кластера. Коэффициенты качества кластеризации Дэвиса-Булдина (лучшее разделение на кластеры при значении близким к 0) и Калински-Харабаша (лучшее значение при максимально большем результате) показали не удовлетворительные результаты, возможно это связано со спецификой наборов данных. С учетом того, что коэффициент силуэта, равный 1, означает, что объект данных не может быть отнесен к другому кластеру, а близкий к 0 показывает перекрещивающиеся кластеры, оценка 0,7 может считаться информативной. При сравнении результатов оценки точности кластеризации двух наборов данных (специализированного вуза и мультипрофильного вуза), представленных в таблице 1, можно предположить, что при увеличении дисциплинарного разнообразия образовательного контента (ИОТ), увеличивается пространство признаков, что вызывает сложность в обработке данных и снижение качества кластеризации.

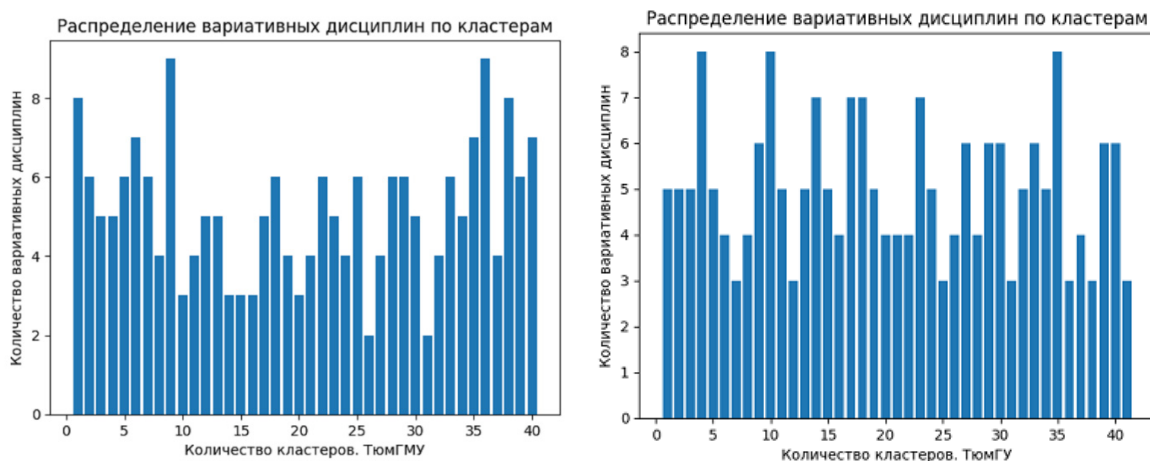


Рисунок 1 – Реализация метода распространения близости. Набор данных специализированного вуза (ТюмГМУ), набор данных мультипрофильного вуза (ТюмГУ)

График разбиения двух наборов текстовых данных методом *DBSCAN* представлен на рисунке 3, график кластеризации методом *OPTICS* – на рисунке 4.

При работе с *OPTICS* на вход подавалась плотностная матрица с уменьшенным пространством признаков, т. к. метрики расстояния алгоритма не

поддерживают разреженные данные. Хотя оба метода представляют собой один и тот же тип плотностных алгоритмов, реализация и результаты их работы оказались разными (табл. 1).

Плотностные алгоритмы показали высокую чувствительность к выбору параметров eps . Параметры были выбраны исходя из специфики

набора данных: $min_samples \leq 3$, т. к. указание большего параметра ближайших выборок теряет смысл (набор данных небольшой), $min_samples \leq 1$ не имеет смысла (слишком малая величина для кластера) и $min_samples \leq 2$ так же не подходит, так как результат будет как при иерархической кластеризации с однозвездной метрикой с разрезом дендрограммы по высоте эpsilon); $eps < 0,5$, т.

к. при указании большего параметра алгоритмы объединяли все кластеры в один или два больших кластера.

При уменьшении пространства признаков оценка точности кластеризации линейно возросла, однако являлась низкой для показателя удовлетворительного качества кластеризации, результаты представлены в таблице 1.

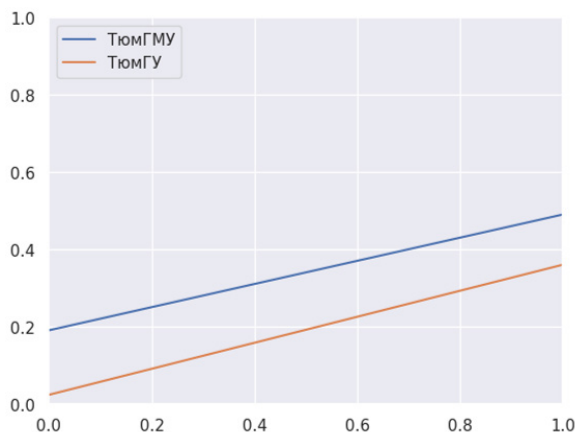


Рисунок 2 – Линейная зависимость показателя точности кластеризации от степени преобработки данных с целью уменьшения размерности пространства признаков

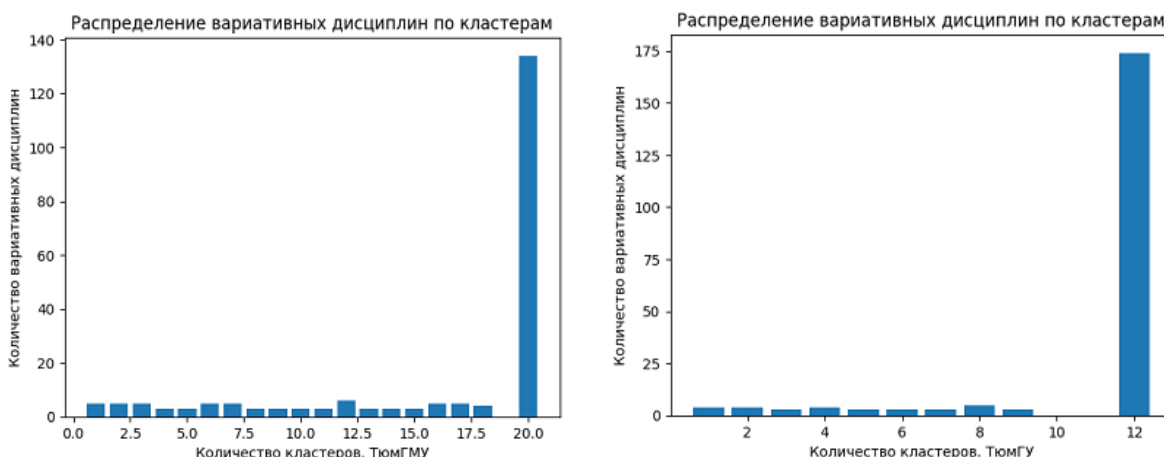


Рисунок 3 – Реализация метода DBSCAN. Набор данных специализированного вуза (ТюмГМУ), набор данных мультипрофильного вуза (ТюмГУ)

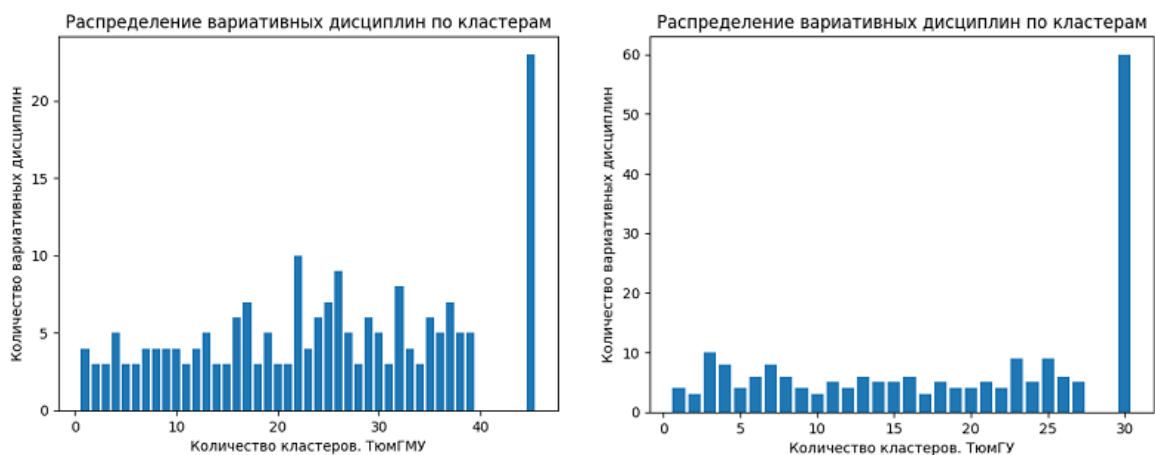


Рисунок 4 – Реализация метода OPTICS. Набор данных специализированного вуза (ТюмГМУ), набор данных мультипрофильного вуза (ТюмГУ)

Плотностные методы сгруппировали данные таким образом: метод *DBSCAN* разбил на 18 кластеров (набор ТюмГМУ), 9 кластеров (набор ТюмГУ), к шуму было отнесено 134 и 174 документа соответственно, остальные данные остались не кластеризованы; метод *OPTICS* разбил на 39 кластеров (набор ТюмГМУ) и 27 (набор ТюмГУ) кластеров, к шуму было отнесено 23 и 60 кластеров соответственно, остальные данные остались не кластеризованы, результаты представлены в таблице 2.

Метод *Agglomerative clustering* сгруппировал документы 59 кластеров (набор ТюмГМУ), 65 кластеров (набор ТюмГУ), среднее количество документов в кластере в обоих наборах данных составило 3. Результаты работы агломеративной кластеризации представлены на рисунке 5 и в таблицах 1, 2. Данный метод показал лучшие результаты при предварительной обработке данных с помощью библиотек *ML (machine learning)*: при уменьшении размерности пространства признаков (усеченного сингулярного разложения) и ограничения связности (граф ближайших соседей). В ходе работы эмпирически были исследованы и подобраны параметры алгоритма, способствующие улучшению качества кластеризации, а именно: параметры функции связи (внутрикластерная дисперсия Уорда) и

пороговое значение расстояния связи (*distance_threshold=2.8*). При увеличении порогового значения выше данного показателя алгоритм создавал большие кластеры и объединял в них не совсем близкие документы, при уменьшении показателя ниже выбранного порогового значения алгоритм образовывал большое количество кластеров с малым количеством документов, что тоже теряет смысл. Коэффициенты качества кластеризации Дэвиса-Булдина и Калински-Харабаша показали не удовлетворительные результаты, однако при сравнении с предыдущими методами результаты оказались выше. В частности, коэффициент Дэвиса-Булдина на наборе данных ТюмГМУ опустился на 0,2, что соответствует улучшению для данного показателя. Для коэффициент качества кластеризации Калински-Харабаша значение в наборе данных ТюмГУ возросло на 3,3, а в наборе данных ТюмГУ на 1.

Оценка качества кластеризации с помощью коэффициента силуэта составила 0,7 (табл. 2), что соответствует достаточно информативному показателю, так значения равные -1 означают что документ был не правильно отнесен к кластеру, значения близкие к 0 указывают на перекрывающиеся кластеры, а значения близкие к 1 показывают на достаточно плотное распределение по кластерам.

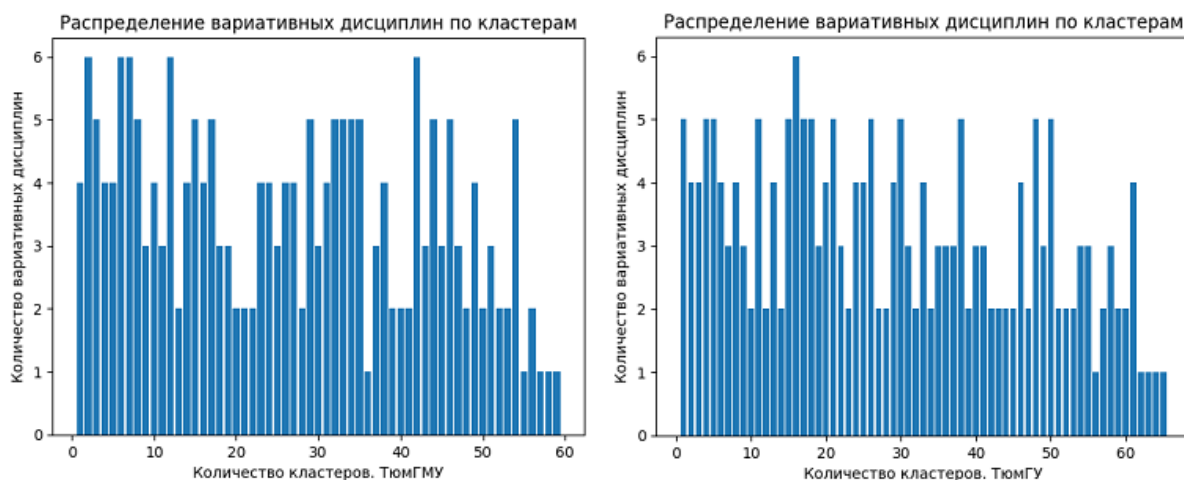


Рисунок 5 – Реализация метода *Agglomerative clustering*. Набор данных специализированного вуза (ТюмГМУ), набор данных мультипрофильного вуза (ТюмГУ)

В ходе эксперимента исследовалась работа алгоритма *BIRCH* при изменении основных параметров. Эмпирическим путем подбиралось пороговое значение (радиус ближайшего подкластера, полученный путем слияния, новой выборки, *threshold=1.2*, при указании меньшего значения алгоритм расщеплял документы на большое количество кластеров). Второй параметр – коэффициент ветвления (*branching_factor=50*), также был найден эмпирическим путем, он показывает максимальное количество подкластеров, которые могут быть созданы в узле. При изменении коэффициента ветвления в большую сторону, количество кластеров

не изменилось, при уменьшении – незначительно увеличилось, подошел вариант значения, заданный по умолчанию. Данное соотношение параметров было применено к обоим наборам данных для сравнительного анализа работы алгоритма. Метод *BIRCH* сгруппировал данные по 59 кластерам (набор ТюмГМУ), 84 кластерам (набор ТюмГУ), среднее количество документов в кластере в наборе ТюмГМУ составило 3, в наборе ТюмГУ – 2, результаты представлены в таблице 1, таблице 2 и на рисунке 7, распределение дисциплин по внутри кластерам на рисунке 8 и рисунке 9. Коэффициенты качества кластеризации Дэвиса-Булдина и Калински-Харабаша

показали не удовлетворительные результаты, результаты представлены в таблице 1. Коэффициент Дэвиса-Булдина показал аналогичные результаты, как и в методе *Agglomerative clustering*, коэффициент качества кластеризации Калински-Харабаша оказался ниже на 1,4 в наборе данных (ТюмГМУ) и на 1 в наборе (ТюмГУ). Оценка качества кластеризации с помощью коэффициента силуэта для набора ТюмГУ оказалась на 0,1 ниже, чем в методе *Agglomerative clustering*, результаты представлены в таблице табл. 1. В отличие от агломеративной кластеризации, алгоритм BIRCH, показал более низкий показатель оценки качества кластеризации по 2 методам оценки, данные были разбиты на точно такое же количество

кластеров в наборе ТюмГМУ и с увеличением на 19 кластеров в наборе ТюмГУ. При увеличении параметра ($threshold=1.2$ до 1,5) для набора ТюмГУ, оценка качества кластеризации по 2 методам незначительно улучшилась: коэффициент Дэвиса-Булдина снизился на 0,1, коэффициент Калински-Харабаша вырос на 1,1, коэффициента силуэта не изменился, но в результате алгоритм разбил данные на меньшее количество кластеров. Таким образом, стоит отметить высокое влияние выбора параметра порога ($threshold$ – радиус подкластера) на показатель качества кластеризации, который в свою очередь будет зависеть от состава набора данных и размерности пространства его признаков.

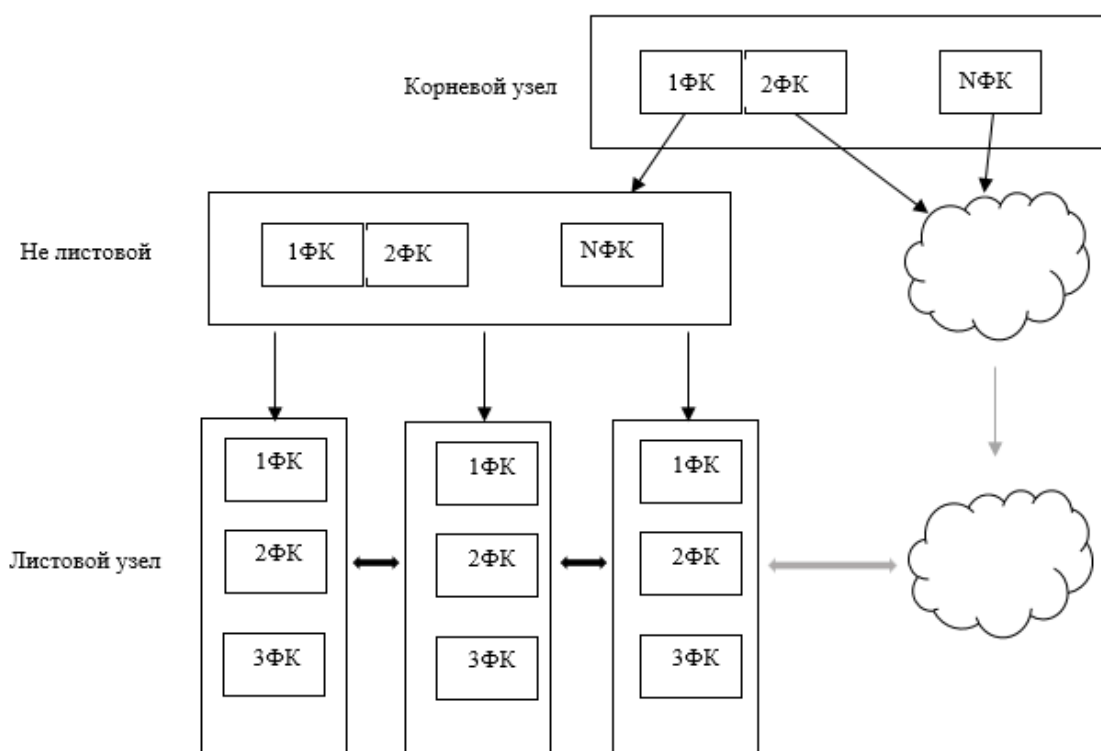


Рисунок 6 – Алгоритм работы метода BIRCH

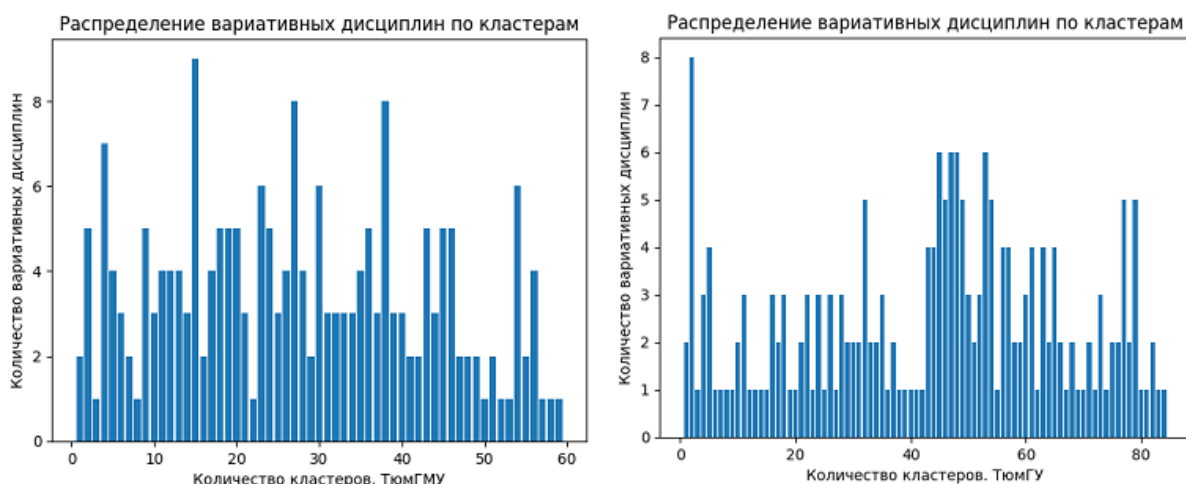


Рисунок 7 – Реализация метода BIRCH. Набор данных специализированного вуза (ТюмГМУ), набор данных мультипрофильного вуза (ТюмГУ)

Порядковые номера дисциплин, входящих в 4 кластер: [26, 44, 75, 76, 81, 108, 109]
 Список дисциплин в кластере:4
 ['анализ', 'дан', 'медицинск', 'исследован', 'раздел', 'особен', 'биомедицинск', 'данныхт', 'общ'

 ['клиническ', 'фундаментальн', 'исследован', 'раздел', 'методолог', 'теоретическ', 'фундаментальн

 ['исследовательск', 'протокол', 'методолог', 'научн', 'деятельн', 'раздел', 'основ', 'методолог',

 ['анализ', 'дан', 'медицинск', 'исследован', 'раздел', 'особен', 'биомедицинск', 'данныхт', 'общ'

 ['клиническ', 'фундаментальн', 'исследован', 'педиатр', 'раздел', 'методолог', 'теоретическ', 'фу

 ['фтдвисследовательск', 'протокол', 'методолог', 'научн', 'деятельн', 'раздел', 'основ', 'методоло

 ['анализ', 'дан', 'медицинск', 'исследован', 'раздел', 'особен', 'биомедицинск', 'данныхт', 'общ'

Рисунок 8 – Реализация метода BIRCH. Распределение обучающих дисциплин внутри кластера. Набор данных специализированного вуза (ТюмГМУ)

Порядковые номера дисциплин, входящих в 22 кластер: [28, 48, 52, 57, 104, 169]
 Список дисциплин в кластере:22
 ['высок', 'математик', 'практическ', 'люб', 'современ', 'професс', 'требова', 'определен', 'математическ', '

 ['математик', 'социальн', 'наук', 'уровен', 'цел', 'являютсяприобретен', 'студент', 'представлен', 'применен

 ['математик', 'менеджер', 'уровен', 'цельюдисциплин', 'явля', 'развит', 'практическ', 'навык', 'решен', 'фор

 ['математик', 'экономист', 'уровен', 'цел', 'задач', 'дисциплиныцел', 'дисциплиныявля', 'развит', 'практичес

 ['линейн', 'алгебр', 'математическ', 'анализмодул', 'линейн', 'алгебр', 'включач', 'матричн', 'векторн', 'алг

 ['математик', 'менеджер', 'уровен', 'цельюдисциплин', 'явля', 'развит', 'практическ', 'навык', 'решен', 'фор

Рисунок 9 – Реализация метода BIRCH. Распределение обучающих дисциплин внутри кластера. Набор данных мультипрофильного вуза (ТюмГУ)

Таблица 1 – Оценка качества кластеризации

Методы кластеризации	Коэффициент качества кластеризации Дэвиса-Булдина		Коэффициент качества кластеризации Калинки-Харабаша		Коэффициент качества кластеризации Силуэта	
	ТюмГМУ	ТюмГУ	ТюмГМУ	ТюмГУ	ТюмГМУ	ТюмГУ
Набор данных						
Распространение близости (<i>Affinity propagation</i>)	0,9	0,4	16,8	10,6	0,7	0,5
DBSCAN	0,9	0,9	5,7	4,1	0,19	0,06
OPTICS	1,4	1,5	13,5	8,1	0,5	0,2
Агломеративная кластеризация (<i>Agglomerative clustering</i>)	0,7	0,8	19,5	11,6	0,7	0,5
BIRCH	0,7	0,8	18,1	10,6	0,7	0,4

Таблица 2 – Распределение документов по кластерам

Методы кластеризации	Количество кластеров		Среднее количество дисциплин в кластере		Количество некластеризованных дисциплин	
	ТюмГМУ	ТюмГУ	ТюмГМУ	ТюмГУ	ТюмГМУ	ТюмГУ
Набор данных						
Распространение близости (<i>Affinity Propagation</i>)	40	40	5	5	—	—
DBSCAN	18	9	10	17	134	174
OPTICS	39	27	5	9	23	60
Агломеративная кластеризация (<i>Agglomerative clustering</i>)	59	65	3	3	—	—
BIRCH	59	84	3	3	—	—

Обсуждение. Результаты, указанные в таблице 1, показывают, что при работе алгоритма *Affinity Propagation*, при условии того что объем данных и настройка гиперпараметров были одинаковые для обоих наборов данных, данные были сгруппированы в одинаковое количество кластеров. При сравнении качества кластеризации по трем параметрам оценки, набор данных представленный

мультипрофильным ВУЗом (ТюмГУ) показал неудовлетворительные показатели по всем метрикам оценки качества кластеризации. Основные причины низкой оценки качества кластеризации коротких текстов [38] – это их длина (как следствие, небольшое число последовательностей, представляющих текст, а также очень низкое пересечение по общим последовательностям между документами),

вторая причина – это структура данных. Тексты мультипрофильного вуза весьма разрознены по тематикам, что усложняет задачу предобработки данных и тем самым снижает качество кластеризации. В таком случае стоит рекомендовать помимо стандартных библиотек предобработки данных библиотеки *Scikit-learn* (*SVD*, поиска графа ближайших соседей и другие), использовать расширенный список стоп-слов при представлении документов с помощью последовательностей из существительных и прилагательных [9]. Плотностные методы кластеризации *DBSCAN*, *OPTICS* [39] оказались высокочувствительны к выбору параметров (*min_samples* и *eps*) при большом пространстве признаков, в результате чего было решено исключить методы *DBSCAN* и *OPTICS* из подбора, так как большая часть дисциплин (больше 50% документов каждого из наборов) осталась некластеризованной или была помечена как шум. В результате чего стоит отметить что для подобных наборов данных (для небольших наборов текстов короткой длины) не стоит использовать методы кластеризации, основанные на плотностях кластеров, так как в подобных случаях (текстовые данные) не будут собираться кластеры с резкими контрастами плотностей данных [40].

При работе иерархических методов *Agglomerative clustering* и *BIRCH* (восходящий алгоритм построения иерархического дерева кластеров) данные были разбиты с лучшими показателями кластеризации по всем методам оценки качества кластеризации по сравнению с предыдущими алгоритмами. При реализации метода *Agglomerative clustering* данные в наборе специализированного вуза были сгруппированы на 59 кластеров и 65 в наборе мультипрофильного вуза – это достаточно много при небольшом наборе данных, однако при сравнении показателей качества кластеризации и состава наполнения кластеров, представленных на рисунке 8 и рисунке 9 можно сказать что именно при таком соотношении гиперпараметров (выбрана функция связи Уорда и пороговое расстояние связи, выше которого кластеры не объединяются, равное 2,8) получается достаточно качественное разбиение данных.

При реализации работы метода *BIRCH* данные в наборе специализированного вуза были сгруппированы также на 59 кластеров, в наборе мультипрофильного вуза – на 84. Хотя этот метод так же является иерархическим, данные оценки качества кластеризации оказались ниже метода *Agglomerative clustering*, данная тенденция объясняется тем, что метод *BIRCH* плохо работает с данными высокой размерности, таким образом (при установке одинаковых значений гиперпараметров) набор данных мультипрофильного вуза показал весьма низкие результаты по показателям оценки качества кластеризации и разбил данные на большое количество кластеров.

Результаты работы вышеприведенных методов кластеризации без явного указания кластеров показали влияние входных данных на реализацию работы алгоритма: при одинаковом объеме (тексты короткой длины, данные высокой размерности), все алгоритмы оценки качества кластеризации показали невысокую оценку у набора мультипрофильного вуза, что показывает необходимость дополнительной предобработки данных, чтобы уменьшить лексическую разрозненность.

В стенах вуза ТюмГМУ создан и тестируется поисковый сервис в виде чат-бота для интеллектуального поиска обучающих программ ИОТ на базе алгоритмов кластеризации. Сервис будет интегрирован в аналитический блок системы поддержки принятия решений вуза. Данное программное решение может быть предложено как для самостоятельной реализации, так и как модуль для интеграции в информационные системы университета.

Выводы. Рассмотренные методы кластеризации (неконтролируемого машинного обучения) были впервые применены к текстам рабочих программ ИОТ, изучены и проанализированы в параллельном анализе состава двух наборов текстовых данных двух различных по специфике обучения вузов (ТюмГМУ и ТюмГУ). Данное исследование показало нам перспективу анализа состава данных в практическом использовании, применительно к образовательным программам вузов. Таким образом, было предложено использовать и применить на практике в модуле рекомендательной системы вуза алгоритмы неконтролируемого машинного обучения согласно указанным личным предпочтениям студента. По результатам исследования, при сравнении методов кластеризации, при реализации метода *Agglomerative clustering* был достигнут наиболее высокий показатель качества кластеризации.

Таким образом, экспериментально было подтверждено, что агломеративная кластеризация является наиболее рекомендуемым методом для работы с небольшим корпусом текстовых документов короткой длины, представленных текстами обучающихся дисциплин широкого спектра областей знаний. Что позволяет рекомендовать его как один из модулей интеллектуального анализа текстов на естественном языке при разработке системы поддержки принятия решений. В перспективе для проектирования СППР при использовании методов интеллектуального анализа текстовых данных следует особое внимание уделить этапу предобработки данных, а именно помимо основных методов сокращения данных (используемых в работе: *SVD*, поиска графа ближайших соседей и других их библиотек *ML*), дополнительно использовать расширенный список стоп-слов [41], выбрать методы векторизации с использованием семантических связей между словами, так как именно от состава и качества предобработки данных зависит как алгоритм поведет себя на этапе формирования кластеров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Сергеева, Е.В. Комплексная автоматизация деятельности университета на базе программного продукта "1С: Университет ПРОФ" / Е.В. Сергеева, А.С. Козлова, К.А. Воробьев // Новые информационные технологии в образовании: Сборник научных трудов 20-й международной научно-практической конференции, Москва, 04–05 февраля 2020 года / Под общей редакцией Д.В. Чистова. Том Часть 2. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "1С-Паблишинг".2020. – С. 48-50.
2. Единая информационная система управления учебным процессом Тандем. Университет. URL: <http://tandemservice.ru/products/tandem-university>. (дата обращения: 24.10.2023)
3. Комплексная информационная система для Университета Магеллан. URL: <https://magellanius.ru/modules>. (дата обращения: 25.10.2023)
4. Goiry A., Scott-Morton M.S. A framework for information systems // Sloan ManagementReview. 1971. № 13 (1). P. 56-79.
5. Reshamwala A., Pawar P. Review on natural language processing // Engineering Science and Technology: An International Journal. 2013. - №3. - P. 113-115.
6. Садовская Л.Л., Гуськов А.Е., Косяков Д.В., Мухамедиев Р.И. Обработка текстов на естественном языке: обзор публикаций // Искусственный интеллект и принятие решений. № 3. С. 66-86.
7. Миркин, Б.Г. Методы кластер –анализа для поддержки принятия решений: Обзор. Препринт WP7/2011/03/ Б.Г. Миркин. М.: Изд. Дом 56 Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», 2011. – С. 88.
8. Пархоменко П.А., Григорьев А.А., Астраханцев Н.А. Обзор и экспериментальное сравнение методов кластеризации текстов // Труды Института системного программирования РАН. Том 29. № 2. С. 161-200.
9. Попова, С.В. Представление документов в задаче кластеризации аннотаций научных текстов / С.В. Попова, В.В. Данилова // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2014. – № 1(89). – С. 99-107.
10. Errecalde M., Ingaramo D., Rosso P.A new AntTree-based algorithm for clustering short-text corpora // J. Computer Sci. Technol. V. 10. N 1. P. 1-7.
11. Errecalde, M., Ingaramo, D., Rosso, P. ITSA: An Effective Iterative Method for Short-Text Clustering Tasks. In: García-Pedrajas, N., Herrera, F., Fyfe, C., Benítez, J.M., Ali, M. (eds) Trends in Applied Intelligent Systems. IEA/AIE 2010. Lecture Notes in Computer Science(), vol 6096. Springer, Berlin, Heidelberg.
12. Rajaraman, A., & Ullman, J. Data Mining. In Mining of Massive Datasets (pp. 1-17). Cambridge: Cambridge University Press.
13. Ишкина Ш.Х., Воронцов К.В. Интеллектуальные системы управления, анализ данных //Автоматика и телемеханика. – 2021. – № 5. – С. 151-168.
14. Дударин, П.В. Подход к обработке обратной связи пользователя для повышения качества результатов работы алгоритма кластеризации / П.В. Дударин, В.Г. Тронин, Н.Г. Ярушкина // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2020. – Т. 22, № 5(97). – С. 94-105.
15. Rajaraman, A., & Ullman, J. Data Mining. In Mining of Massive Datasets (pp. 1-17). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9781139058452.002 URL: <http://infolab.stanford.edu/~ullman/mmds/book.pdf>. (дата обращения 26.10.2023)
16. Кравченко, Ю.А. Векторизация текста с использованием методов интеллектуального анализа данных / Ю.А. Кравченко, А.М. Мансур, Ж.Х. Мохаммад // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 2(219). – С. 154-167.
17. Уменьшение линейной размерности посредством усеченного разложения по сингулярным значениям (SVD). URL: <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.decomposition.TruncatedSVD.html>. (дата обращения 26.10.2023).
18. Садрудинов Ф.Р. Обзор и сравнение оценок точности методов (SVD, SVD++, NMF) реализации рекомендательной системы на основе коллаборативной фильтрации // Образование в России и актуальные вопросы современной науки: сб. ст. 5-й Всерос. науч.-практ. конф. Пенза: Пензенский гос. аграр. ун-т. С. 387-391.
19. Кириченко К.М., Герасимов М.Б. Обзор методов кластеризации текстовой информации // Электронное научное издание «Ученые заметки ТОГУ». 2016. Том 7, № 3. С. 104-110.
20. Файзрахманов, Р.А. Построение модели ИТ-специалиста на основе нечеткой кластеризации для системы поддержки принятия решений в сфере кадрового обеспечения / Р.А. Файзрахманов, Д.В. Яруллин // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. – 2020. – Т. 1. – С. 250-254.
21. Давыдов О.А. Анализ существующих алгоритмов кластеризации (часть 1) // Вестник Тихоокеанского государственного университета. № 1 (56). С. 27–36.
22. Goiry A., Scott-Morton M.S. A framework for information systems // Sloan ManagementReview. 1971. № 13 (1). P. 56-79
23. Бова В.В., Кравченко Ю.А., Родзин С.И. Методы и алгоритмы кластеризации текстовых данных (обзор) // Известия ЮФУ. Технические науки. № 4 (228). С. 122-143.
24. Исаков С.С. Кластеризация и многоступенчатый семантический анализ научных текстов // Моделирование и анализ данных. Том 12. № 4. С. 105-109.
25. Янул А.Д. Определение этапов предварительной обработки текста и выбор алгоритма кластеризации сообщений журнальных файлов сервера // Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. Том 7. № 3-2 (25). С. 8-15.
26. Вишняков И.Э., Иванов И.П., Каркин И.А. Выявление и кластеризация шаблонных текстов в больших массивах сообщений // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Приборостроение. № 4 (141). С. 20–35.
27. Fomin S.A., Belousov R.L. 2017. Detecting semantic duplicates in short news items // Business Informatics. No. 2 (40). Pp. 47–56.
28. Виноградова Д.А. Исследование применимости алгоритмов кластеризации Affinity propagation, DBSCAN к решению задачи поиска пользователей-экспертов в социальных сетях // Молодежь и современные информационные технологии: сб. тр. 16-й Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та. С. 160–161.
29. Brendan J. Frey; Delbert Dueck (2007). Clustering by passing messages between data points. Science. 315 (5814): С. 972–976
30. Martin Ester, Hans-Peter Kriegel, Jörg Sander, Xiaowei Xu. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise // Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-96) / Evangelos Simoudis, Jiawei Han, Usama M. Fayyad. –AAAI Press, 1996. – С. 226-231.
31. Ankerst, Mihael, Markus M. Breunig, Hans-Peter Kriegel, and Jörg Sander. "OPTICS: ordering points to identify the clustering structure." ACM SIGMOD Record 28, no. 2 (1999): – С. 49-60.
32. Уиллиамс У.Т., Ланс Дж.Н. Методы иерархической классификации // Статистические методы для ЭВМ / под ред. К. Энслейна, Э. Рэлстона, Г.С. Уилфа. – М.: Наука, 1986. – С. 269-300
33. Булыга Ф.С., Курейчик В.М. Алгоритмы агломеративной кластеризации применительно к задачам анализа лингвистической экспертной информации. //Известия ЮФУ. Технические науки. №6.
34. Булыга, Ф.С. Алгоритмы агломеративной кластеризации применительно к задачам анализа лингвистической экспертной информации / Ф.С. Булыга, В.М. Курейчик // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 6(223). – С. 73-88.
35. Driver and Kroeber "Quantitative Expression of Cultural Relationships". University of California Publications in American Archaeology and Ethnology. Berkeley, CA: University of California Press. Quantitative Expression of Cultural Relationships: - С. 211–256
36. Zhang T., Ramakrishnan R., Livny M. BIRCH: an efficient data clustering method for very large databases // Proceedings of the 1996 ACM SIGMOD international conference on Management of data - SIGMOD '96. – 1996.

37. Летова, М.С. VIRCH: эффективный метод кластеризации для очень больших массивов числовых данных / М.С. Летова // Аллея науки. – 2017. – Т. 2, № 12. – С. 3-5.

38. Гума, С.Н. Модификация алгоритма латентно-семантического анализа для сравнения коротких текстов / С.Н. Гума, И.А. Коломойцева // Информатика, управляющие системы, математическое и компьютерное моделирование (ИУСМКМ-2020): Сборник материалов XI Международной научно-технической конференции в рамках VI Международного Научного форума Донецкой Народной Республики, Донецк, 27-28 мая 2020 года / Редколлегия: Ю.К. Орлов [и др.]. – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2020. – С. 91-95. – EDN ZRNEXY.

39. Михаэль Анкерст; Маркус М. Брюниг; Ханс-Петер Кригель; Йорг Сандер ОПТИКА: Упорядочение точек для определения структуры кластеризации. Международная конференция ACM SIGMOD по управлению данными. АКМ Пресс. – С. 49-60.

40. Martin Ester, Hans-Peter Kriegel, Jörg Sander, Xiaowei Xu. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise // Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-96) / Evangelos Simoudis, Jiawei Han, Usama M. Fayyad. – AAAI Press, 1996. – С. 226-231.

41. Cagnina L., Errecalde M., Ingaramo D., Rosso P.A discrete particle swarm optimizer for clustering short text corpora // Proc. of the 3 rd International Conference on Bioinspired Optimization Methods and their Applications (BIOMA08). Ljubljana, Slovenia, 2008. P. 93-103.

Статья поступила в редакцию 03.11.2023

Статья принята к публикации 15.12.2023

УДК 004.932
EDN: MCWDEQ

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ СЪЕМКИ ФОТОГРАФИИ НА ОСНОВЕ ВИЗУАЛЬНОГО ПОИСКА

© Автор(ы) 2023
SPIN: 1201-5071
AuthorID: 681509
ORCID: 0000-0002-4796-0776
ScopusID: 55980530400

НИКИФОРОВ Михаил Борисович, кандидат технических наук, доцент кафедры
Электронные вычислительные машины», директор НОЦ «Специализированные ЭВМ»
Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина
(390005, Россия, Рязань, улица Гагарина, 59/1, e-mail: nikiforov.m.b@mail.ru)

SPIN: 9234-4483
AuthorID: 952662
ORCID: 0009-0007-4358-7736
ScopusID: 57211426640

ТАРАСОВА Валентина Юрьевна, старший преподаватель
кафедры Электронные вычислительные машины»
Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина
(390005, Россия, Рязань, улица Гагарина, 59/1, e-mail: Valentina2008.91@mail.ru)

Аннотация. В статье решается задача определения местоположения съемки на основе алгоритма визуального поиска. Кроме местоположения также выводятся схожие по содержанию изображения из поисковой коллекции. В работе предлагается определить место съемки фотографии с помощью поиска из фотоколлекции на основе визуального сходства пар изображений. Предложенный метод позволяет только по графическому отображению, без использования ключевых слов и метаданных, определить место съемки. В качестве исходных данных применяются элементы фотоколлекции, состоящие из панорамных снимков городов, которые были получены с использованием сервиса Яндекс Карты. Так как данный сервис не дает возможность загрузки панорамного снимка целиком, а только его частей, в работе также рассматривалась задача склейки панорамного снимка. Пользователь загружает изображение-запрос, и на основе алгоритма визуального поиска происходит обнаружение схожих по содержанию изображений, а также определение места съемки. На основе разработанного метода выводится карта города с отмеченными координатами визуально схожих панорамных снимков и сами снимки. Предложенный метод в сравнении с методом без использования оценки цветовой составляющей позволяет увеличить вероятность обнаружения места съемки на 11,32%.

Ключевые слова: визуальный поиск, ключевые точки, хэширование изображения, обнаружение места съемки фотографии.

METHOD FOR DETERMINING PHOTO SHOOTING LOCATION BASED ON VISUAL SEARCH

© The Author(s) 2023

NIKIFOROV Mikhail Borisovich, candidate of technical sciences, associate professor of
the Department of Electronic Computers, director of the REC "Specialized Computers"
Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin
(390005, Russia, Ryazan, Gagarina street, 59/1, e-mail: nikiforov.m.b@mail.ru)

TARASOVA Valentina Yuryevna, senior lecturer Department of Electronic Computers
Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin
(390005, Russia, Ryazan, Gagarinastreet, 59/1, e-mail: Valentina2008.91@mail.ru)

Abstract. The article solves the problem of determining the shooting location based on a visual search algorithm. In addition to the location, images from the search collection that are similar in content are also displayed. The paper proposes to determine the location where a photograph was taken by searching from a photo collection based on the visual similarity of pairs of images. The proposed method allows us to determine the shooting location only by graphic display, without using keywords or metadata. As initial data, elements of a photo collection are used, consisting of panoramic images of cities that were obtained using the Yandex Maps service. Since this service does not allow you to download an entire panoramic image, but only parts of it, the work also considered the task of stitching a panoramic image. The user uploads a query image, and based on a visual search algorithm, images with similar content are detected, as well as the location of the shooting is determined. Based on the developed method, a map of the city with marked coordinates of visually similar panoramic images and the images themselves are displayed. The proposed method, in comparison with the method without using an estimate of the color component, makes it possible to increase the probability of detecting the shooting location by 11.32%.

Keywords: visual search, key points, image hashing, photo location detection.

Для цитирования: Никифоров М.Б. Метод определения местоположения съемки фотографии на основе визуального поиска / М.Б. Никифоров, В.Ю. Тарасова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 12. – № 4(64). – С. 103-110. – EDN: MCWDEQ.

Введение. В настоящее время определение местоположения по фотографии является важной задачей, для решения которой используются различные методы и технологии, такие как: анализ метаданных, обнаружение совпадения в сети Интернет, с использованием *OSINT*-инструментов (*Opensourceintelligence*) [1]. Поиск по метаданным изображения применим в том случае, если нужная информация собрана автоматически. Метаданные включают в себя различные сведения, такие как дата и время съемки, модель/серия устройства фотосъемки, разрешение кадра, географические координаты и другие параметры. Местоположение может быть прикреплено к метаданным только в том случае, если снимок сделан на смартфон или камеру с поддержкой *GPS* и активной функцией геолокации [1]. К недостаткам метода можно отнести невозможность поиска по фотографии. Данный вид поиска производит только анализ метаданных, записанных в файл. Однако метаданные изображения не всегда доступны, поскольку в устройстве может быть выключена функция определения геолокации.

Использование поисковых систем позволяет найти визуально похожие снимки, а также получить связанную с ними информацию об интересующем здании, инфраструктурном объекте или памятнике архитектуры, позволяющие также определить его местоположение. Недостатком данных сервисов является то, что алгоритмы в поисковых системах не справляются с поиском панорамных снимков.

В работе предлагается обнаруживать место съемки исключительно по графической информации с использованием алгоритма визуального поиска [2]. Целью работы является разработка метода обнаружения местоположения съемки на основе фотоколлекции городских панорам. Предложенный метод основан на визуальном сходстве пары изображений. Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

- вычисление числовых характеристик изображения, которые определяют наиболее заметную визуальную информацию из пикселей;
- измерение визуального сходства между изображениями, которое используется для ранжирования изображений в соответствии с показателем сходства [3];
- разработка программного обеспечения для обнаружения местоположения съемки на основе фотоколлекции городских панорам.

Суть метода определения местоположения съемки фотографии заключается в ранжировании изображений в соответствии с визуальным сходством загруженного изображения и изображений из поисковой коллекции. На основе алгоритма визуального поиска каждому изображению ставится

в соответствие некоторый хэш фиксированной длины. Данный хэш содержит в себе информацию о цветовой составляющей изображения и об информационном содержании изображения. Для формирования хэша предлагается использовать комбинацию методов компьютерного зрения, а для сравнения сформированных хэшей – метрическую оценку сходства. Чем данная оценка ниже, тем наиболее схожими являются изображения. Местоположение съемки определяется исходя из оценки сходства. Если изображение снято в данной локации, то оценка является минимальной. В качестве результата поиска выводится карта города с отмеченными локациями и первые 10 наиболее схожих изображений, чьи локации отмечены на карте. Стоит отметить, что в условиях однотипной городской застройки работа предложенного метода существенно усложняется. В данном случае место съемки может быть получено не в первой десятке ранжированных фотоснимков, а в первой сотне поисковой выборки. В данном случае определить корректность работы разработанного метода сможет только пользователь.

Методология. Визуальный поиск (поиск по заданному сюжету) относят к области информационного поиска. Он предназначен для обнаружения по загруженному пользователем изображению схожих по содержанию графических файлов в поисковой коллекции. Поиск основан на методах и алгоритмах компьютерного зрения и позволяет анализировать объекты на изображении. В отличие от традиционных методов, таких как индексирование и полный перебор, визуальный поиск анализирует содержимое изображений, а не только их текстовые атрибуты, и позволяет выполнять поиск без использования ключевых слов или метаданных. Данные методы, как правило, учитывают только пиксели изображения, и не используют дополнительную информацию, такую как метаданные, ключевые слова, что упрощает поиск.

Определение визуального сходства – это задача, которая определяет насколько идентичны два изображения, используя их визуальное содержание. Дано n -изображений из поисковой коллекции изображений I , для каждого изображения $I_i \in I$ с $i \in [1, n]$, глобальное d -мерное представление $x_i \in R^d$, получается как $x_i = f(I_i, w_f)$, где f – функция, которая отображает изображения в глобальные признаки и w_f – это набор параметров f . Определим s_{ij} как показатель сходства, который измеряет насколько подобны два изображения I_i и I_j . Чем меньше s_{ij} , тем больше похожи I_i и I_j . Решаемая задача состоит в изучении функций визуального сходства S , которая вычисляет показатель сходства из глобальных представлений изображения как:

$$s_{i,j} = S(x_i, x_j) = g(f(I_r, w_r), f(I_g, w_g), w_g),$$

if $s_{i,j} < s_{i,k}$ then I_r, I_g , more similar I_r, I_k , (1)
где g – нелинейная функция и w_g – набор параметров для оптимизации [3].

Существует следующие подходы для определения схожих пар изображений:

- с использованием попиксельного сравнения;
- на основе среднеквадратического отклонения (СКО);
- на основе экспертных систем [4];
- с использованием компьютерного зрения и машинного обучения [5-11].

Первые два подхода обнаруживают одинаковые изображения, имеющие идентичную сцену их визуальное различие для пользователя не заметно. Однако, если изображение повернуто на определенный угол, снято в другое время суток, то используются экспертные системы или методы на основе машинного обучения и алгоритмов компьютерного зрения. Экспертные системы могут использовать предварительно заданные правила для определения сходства между изображениями, учитывая такие факторы, как цвет, форма, текстура и другие характеристики объектов и фона на изображении.

Другой подход – это использование алгоритмов компьютерного зрения и машинного обучения для извлечения визуальных признаков и их сравнения. Эти методы могут включать в себя анализ контуров, цветовых гистограмм, текстурных характеристик, а также глубину и перспективу объектов на изображении. Поиск по образцу может быть реализован с использованием разных технологий, таких как методы сопоставления шаблонов, дескрипторы особых точек или нейронные сети, комбинирование которых может обеспечить более точный и надежный поиск схожих по содержанию изображений.

В работе [12] нами было выдвинуто предположение, что для получения оценки визуального сходства, которая бы учитывала информацию о цветовой составляющей и об информационной необходимо рассмотреть комбинацию этих двух оценок.

Оценка информационного содержания представляет собой численную характеристику. Фотографии из поисковой коллекции преобразуются в некоторый хэш, описывающий, что именно изображено на фотографии, а так же позволяющий оперативно сравнивать пару изображений. При использовании данной оценке не используется дополнительная информация, такая как дата съемки, название фото [12].

Оценка цветовой составляющей основывается на различных характеристика, каждая из которых отражает определенные аспекты цвета на изображении и может быть использована для его анализа. Например, оценка одной характеристики основана на анализе гистограммы изображения, позволяющей определить распределение яркости и цвета на всем

изображении. Другая оценка может быть связана с анализом контрастности и насыщенности цветов, что помогает определить, насколько яркие и насыщенные цвета на изображении. Комбинация этих двух или более оценок может улучшить точность определения цветовой характеристики изображения и учесть различные аспекты цветового содержания.

В данной работе используется комбинация этих двух оценок.

На рисунке 1 приведена структура системы визуального поиска. Блок извлечения признаков вычисляет визуальные представления изображений, тогда как блок визуального сходства оценивает показатель сходства. После оценки информационного содержания и оценки цветовой составляющей формируется вектор размерностью 1 хК. Оценка сходства между двумя изображениями вычисляется на основе Евклидова расстояния.

Вычисление числовых характеристик для визуальной информации на изображении. Для визуального поиска полученные характеристики должны быть инвариантны к углам поворота, изменению масштаба и угла зрения [13, 14]. На рисунке 2 приведена схема вычисления числовых характеристик для визуальной информации на изображении.

На изображении определяется количество классов с использованием первой производной. Перед этим применим медианную фильтрацию, которая позволяет уменьшить влияние шумовой составляющей на изображении. С помощью квантования первой производной убирает близкие к нулю значения и определяем количество пиков на гистограмме.

Далее на изображении определяются ключевые точки. Изображение представляется в виде математической модели. Ключевой называется такая точка изображенного объекта, которая с большей долей вероятности будет найдена на другом изображении этого же объекта [15]. В предложенной системе использовался детектор SURF, так как он обладает наилучшей точностью при масштабировании, высокой точностью при изменении яркости (результат экспериментальной проверки приведен в таблице 1).

Для хэширования изображения использовалась сверточная нейронная сеть, которая основывается на операциях свертки и подвыборк [16]. Для этого используется 3 цветовых канала: R , G , B и производится нормирование значений в диапазоне $[0; 1]$ по формуле:

$$q(p, \min, \max) = (p - \min) / (\max - \min), \quad (2)$$

где q – функция нормализации, p – значение цвета пикселя в диапазоне $[0; 255]$, \min – минимальное значение, \max – максимальное значение.

При помощи операции свертки, за 6 итераций осуществляется преобразование изображения в хэш [17]. Некоторое ядро свертки обрабатывает предыдущее ядро по фрагментам. С использованием

ядра свертки находятся определенные признаки объектов на изображении. Ядро проходит по предыдущей итерации и производит операцию свертки. При этом используется операция *ReLU*, которая устанавливает в нулевое значение все отрицательные элементы [16].

Применяемая операция подвыборки представляет собой нелинейное уплотнение карты признаков, при котором группа пикселей (2x2) уплотняется до 1 пикселя. Цель операции подвыборки – уменьшение размерности результата предыдущей операции (свертки).

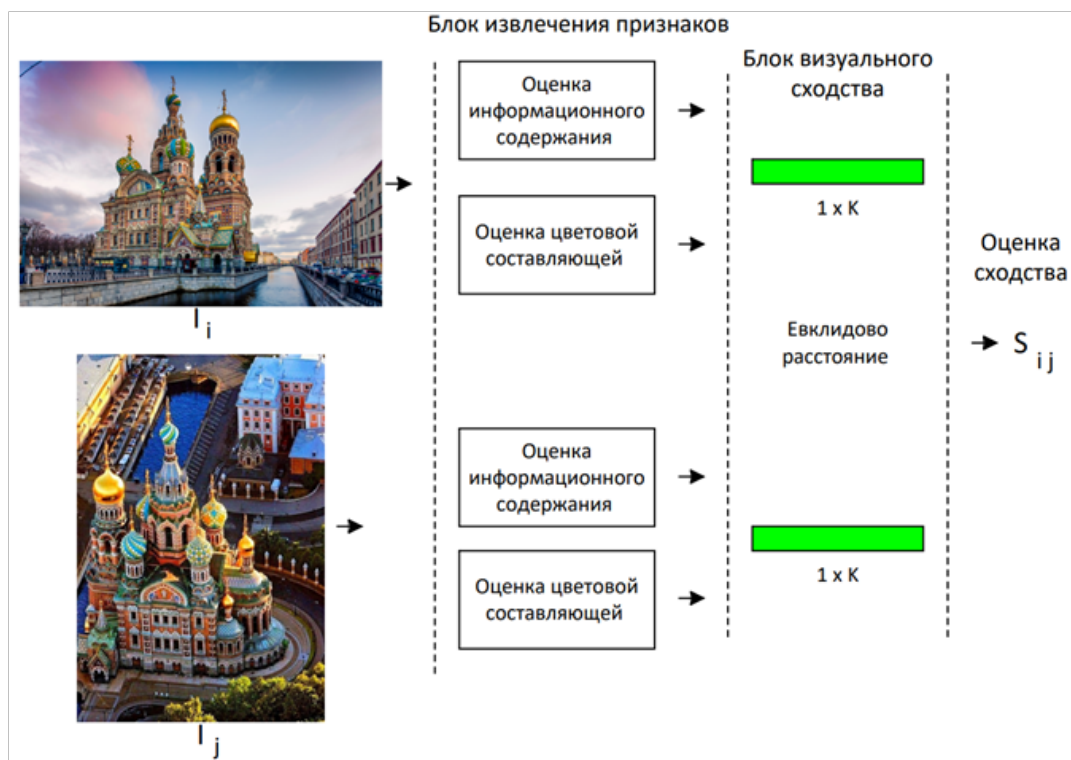


Рисунок 1 – Структура системы визуального поиска

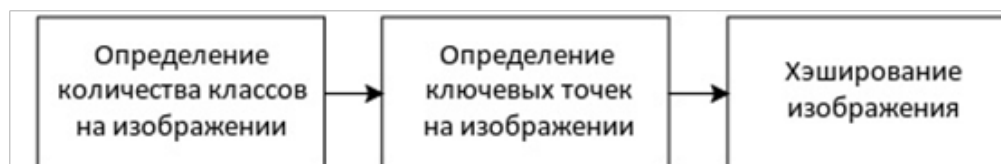


Рисунок 2 – Схема вычисления числовых характеристик для визуальной информации на изображении

После прохождения 7 свёрточных блоков формируется результирующий вектор из 256 значений, к которому дополнительно добавляются данные о цветовой составляющей. Количество слоёв СНС подбиралось экспериментальным путем. В данной работе исследовалась структура СНС с разным количеством слоёв, и на основе полученных результатов было выбрано оптимальное количество слоёв, которое обеспечивает наилучшие результаты обнаружения схожих по содержанию изображений.

После трёх слоёв формируется результирующее значение, на основе которого вычисляют численную меру близости двух изображений.

Измерение визуального сходства между изображениями. Для числовой оценки визуального сходства между изображениями предлагается использовать метрическую оценку. Она применяется для измерения сходства между изображениями, учитывая их инвариантность к различным преобразованиям.

Вычисление таких метрик, как Евклидово расстояние, косинусное сходство или корреляционное сходство, позволяет сравнивать изображения, игнорируя их повороты, масштаб и угол зрения.

Эти методы позволяют достичь инвариантности к различным преобразованиям и обеспечивают точную метрическую оценку для анализа изображений. Расчет численной меры сходства вычисляется следующими образом:

$$list_Score_i = |score_{img} - score_i|, \quad (3)$$

где $score_{img}$ – вычисленный хэш для загруженного пользователем изображения, $score_i$ – вычисленный хэш для изображений из поисковой коллекции, $list_Score_i$ – численная мера сходства загруженного изображения и i -го из поисковой коллекции, $i \in [1, n]$, n – количество изображений в поисковой коллекции.

На рисунке 3 приведена числовая мера сходства между изображениями.

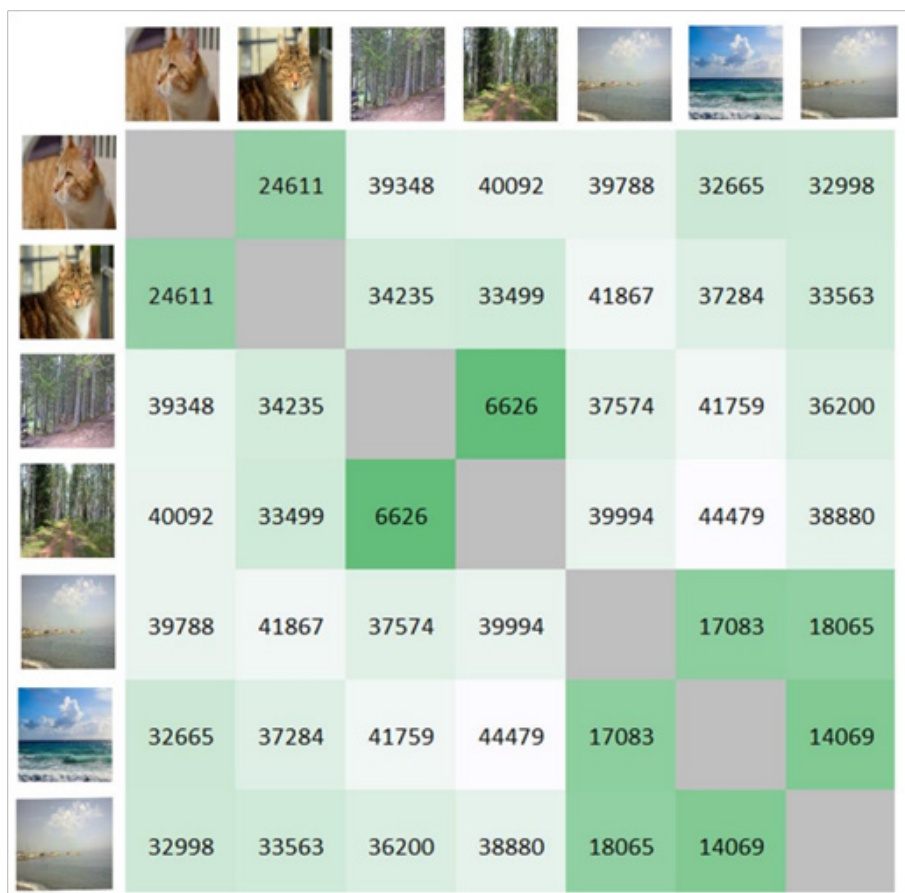


Рисунок 3 – Числовая мера сходства между изображениями

У наиболее близких по содержанию фотографий, численная мера меньше. По главной диагонали эта разность не вычислялась, так как разница между двумя одинаковыми изображениями равна нулю.

Результаты. Для проведения эксперимента были получены панорамные снимки улиц г. Рязани, в количестве 20000 панорам. В качестве источника данных был выбран сервис Яндекс Карты. Метаинформация представлена в виде объектно-ориентированной базы данных в формате *JSON*. Сами изображения загружены локально и сжаты алгоритмом с использованием ортогональных преобразований [18].

В таблице 1 приведена сравнительная характеристика детекторов ключевых точек:

- время выполнения;
- точность при масштабировании;
- точность при изменении яркости.

В качестве исходных данных использовались

следующие изображения: нарисованные пользователем (картинка), изображения, подверженные размытию, изображения с наличием шума, сканированные изображения.

На основе проведенного исследования для дальнейшей работы был выбран детектор *SURF*, так как он обладает наилучшей точностью при масштабировании, высокой точностью при изменении яркости и является не только детектором, но и дескриптором.

Как показали результаты экспериментального исследования, приведенные в таблице 2, разработанный метод позволяет определять место съемки изображений с вероятностью всего 82,56 %.

Для повышения вероятности определения места съемки к оценке информационного содержания поочередно добавлялись некоторые характеристики, отвечающие за цветовую составляющую [19]. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 1 – Характеристики детекторов

Название детектора	Характеристики		
	Время выполнения (мс)	Точность при масштабировании	Точности при изменении яркости
FAST	18	0,45	0,98
SIFT	110	0,11	0,75
STAR	19	0,36	0,99
SURF	30	0,50	0,98

Таблица 2 – Влияние различных цветовых характеристик на работу метода

№	Характеристики	Вероятность определения места съемки изображения
1	Без цветовых характеристик	82,56%
2	Экспозиция	89,61%
3	Контрастность	83,15%
4	Баланс белого	83,71%
5	Гистограмма	86,81%
6	Средний цвет	88,59%
7	3 ключевых цвета	92,82%
8	3 ключевых цвета и экспозиция	92,87%
9	3 ключевых цвета и гистограмма	93,92%
10	3 ключевых цвета и дескриптор ключевых точек	93,98%

Таким образом, наибольшую вероятность определение места съемки изображения 93,98% демонстрирует анализ информационной составляющей в комбинации со сведениями о ключевых цветах и ключевых точках.

Обсуждение. Местоположение фотографии определяется следующим образом: в поисковой коллекции изначально хранятся GPS-координаты панорамного снимка, его местоположение и имя файла, и на основе алгоритма поиска изображений по заданному сюжету в поисковой коллекции осуществляется обнаружение визуально схожих изображений. Загруженное пользователем изображение-запрос поступает без информации о местоположении. На основе алгоритма выбираются 10 визуально схожих изображений и, в результате поискового запроса, выводится карта города с отмеченным местом съемки. Так же в качестве результата поисковая выборка выводит 10 наиболее схожих изображений, чьи локации и были отмечены на карте. Ограничение в 10 изображений было введено для наглядности вывода результата поиска. Корректность работы алгоритма определения места съемки можно оценить, если пользователь

изначально знает локацию загруженного им изображения или исходя из визуального сходства результатов поисковой выборки.

На рисунке 4 изображены результаты программной реализации метода. В левом верхнем углу представлено изображение-запрос, загруженное пользователем, ниже приведены похожие изображения из поисковой коллекции. На карте фиолетовым цветом выделены идентичные запросу локации, синим цветом – локация изображения-запроса.

Первым выводится изображение-запрос, вторым и последующими – наиболее визуально схожие изображения. Применительно в задаче определения местоположения съемки – это изображения с той же или соседней локацией.

Исходя из рисунка 4, можно сделать вывод, что разработанный метод и его программная реализация в двух случаях из 10 дала неверный результат. В таблице 3 приведена оценка времени выполнения программной реализации предложенного метода на разных платформах:

- Intel core i5 (7th gen);
- IntelPentium (2nd gen);
- AMD Ryzen 7.

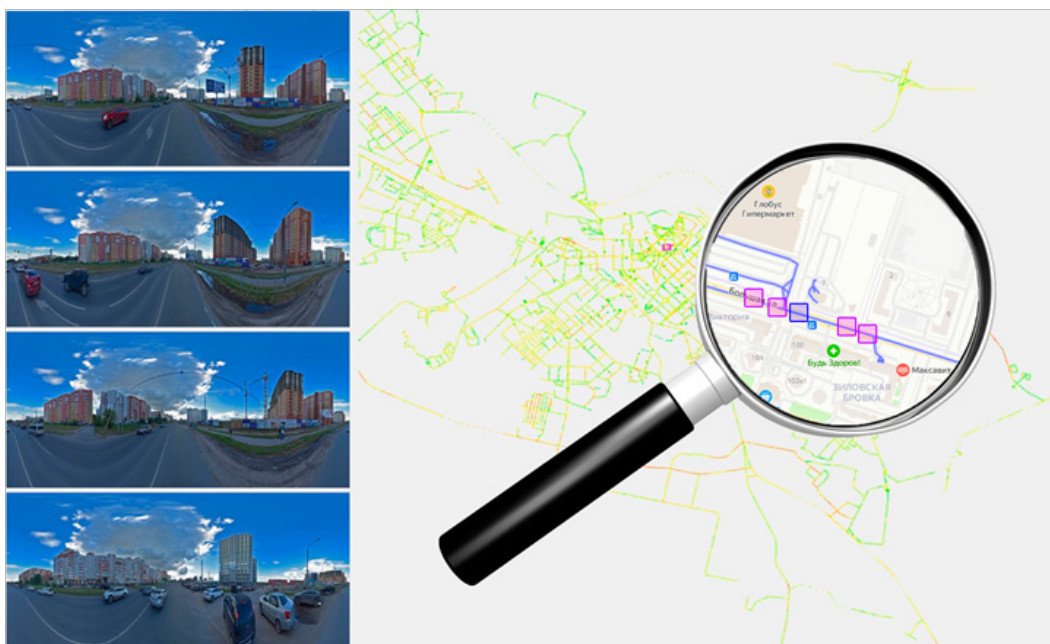


Рисунок 4 – Результат работы программной реализации метода

Таблица 3 – Оценка времени выполнения программной реализации предложенного метода

Платформа	Время хэширования 30 000 фото (HDD)	Время поиска изображения в поисковой коллекции		
		Из 1000 фото	Из 10 000 фото	Из 100 000 фото
Intel core i5 (7th gen)	10 мин	45 мс	196 мс	418 мс
IntelPentium (2nd gen)	15 мин	67 мс	378 мс	981 мс
AMD Ryzen 7	7 мин	37 мс	152 мс	346 мс

Анализируя данные, приведенных в таблице 3, можно сделать вывод, что программная реализация предложенного метода позволяет с высокой скоростью обнаруживать фотографии в поисковой коллекции. Продолжительное время хэширования изображений объясняется тем, что современные жесткие диски имеют низкую пропускную способность. При выполнении хэширования на SSD скорость повышается в 2-3 раза.

Выводы. Исходя из проведенного эксперимента, можно сделать вывод, что разработанный метод и его программная реализация позволяет с высокой вероятностью определить место съемки загруженного пользователем изображения. В данной работе кроме задачи определения местоположения съемки также решались следующие задачи: склейки панорамного снимка, формирование поисковой коллекции, определение оптимального количества слоев СНС, анализ влияния различных цветовых характеристик на работу предложенного метода, оценка времени выполнения хэширования изображений из поисковой коллекции и оценка времени поиска изображения. Указанные выше задачи были решены, и можно сделать вывод, что программная реализация предложенного метода может быть использована в поисковых коллекциях больших объемов данных.

Несмотря на полученные результаты, остаётся открытым вопрос улучшения работы предложенного метода в сложных погодных условиях, например, туман или снег, когда большинство интересующих объектов сокрыто или значительно видоизменено. Устранение вышеуказанного недостатка будет рассмотрено в следующих публикациях.

В данной статье решена задача определения местоположения съёмки на основе панорамных изображений с использованием визуального поиска, и был предложен метод формирования информационной составляющей изображения, а также проведено экспериментальное исследование эффективности его работы, в результате которого была загружена и сформирована поисковая коллекция, состоящая из панорамных изображений. Исходя из полученных результатов, сделан вывод, что программная реализация разработанного метода позволяет с высокой скоростью и необходимой эффективностью определять расположение места съемки. Разработанный метод и его программная реализация могут быть применимы в поисковых коллекциях больших объемов данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Как определить местоположение по фото: современные методы и технологии [Электронный ресурс] <https://comppconfig.ru/internet/kak-opredelit-mestopolozhenie-po-foto.html> (дата обращения 11.08.2023)
2. Никифоров М.Б., Тарасова В.Ю. Алгоритм обнаружения визуального сходства изображений // Цифровая обработка сигналов. – 2022. – № 3. – С. 53-57.
3. Noa Garcia, George Vogiatzis. Learning non-metric visual similarity for image retrieval // Image and Vision Computing Volume 82 Issue C Feb 2019 pp 18–25 <https://doi.org/10.1016/j.imavis.2019.01.001>
4. Elad Hoffer and Nir Ailon. Deep metric learning using triplet network. In International Workshop on Similarity-Based Pattern Recognition, 2015.
5. Herve Jegou and Ondrej Chum. Negative evidences and co-occurrences in image retrieval: The benefit of pca and whitening. In Computer Vision – ECCV 2012. Springer, 2012.
6. Левашкина А.О., Поршнев С.В. Исследование возможности использования ключевых точек в задаче поиска изображений с визуально похожими объектами // Информационные технологии. – 2011. – № 2. – С. 62-67.
7. Галахов Д.И., Гора С.Ю., Гордиенко В.В., Довгаль В.М. Алгоритм ассоциативного поиска изображений на основе хаотических последовательностей // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2011. – № 3 (36). – С. 105-107.
8. Гора С.Ю., Довгаль В.М. Об одном подходе к поиску изображений по содержанию. // В мире научных открытий. Красноярск: научно-инновационный центр. – 2013. – № 6.1(42). – С. 23-38.
9. Папулин С.Ю. Способ поиска изображений по содержанию на основе логико-гистограммного представления признака цвета с применением текстового запроса пользователя // Итоги диссертационного исследования: Матер. IV Всерос. конкурса молодых ученых. М.: РАН, 2012. – Т. 3. – С. 95-106.
10. Левашкина А.О. Разработка методов поиска изображений на основе вычислительных моделей визуального внимания // диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики. Новосибирск, 2009
11. Жукова К.С., Кирпичников А.П., Ляшева С.А., Шлеймович М.П. Система контекстного поиска видеоизображений // Вестник Технологического университета. – 2018. – Т. 21. – № 9. – С. 154-157.
12. Тарасов А.С., Тарасова В.Ю. Разработка системы поиска похожих изображений в локальных хранилищах // Нейроинформатика-2020. сборник научных трудов. XXII международная научно-техническая конференция. Москва, 2020. – С. 286-293.
13. Bodrov O.A., Tarasov A.S., Tarasova V.Y., Bodrova I.V. IMAGE SEARCH ALGORITHM IN LOCAL DATA BASE 8th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2019 - Proceedings. 8. 2019. С.453-455. DOI: 10.1109/MECO.2019.8759996
14. Artem Babenko and Victor Lempitsky. Aggregating local deep features for image retrieval. In Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, 2015.
15. Построение SIFT дескрипторов и задача сопоставления изображений [Электронный ресурс] <https://habr.com/post/106302/> (дата обращения 18.12.18)
16. Николенко С., Кадурин А., Архангельская Е. Глубокое обучение погружение в мир нейронных сетей. – СПб: Питер, 2019. – 480 с.

17. Гринченко Н.Н., Герашенко Е.С., Тарасов А.С., Тарасова В.Ю. Программа для визуального поиска изображений с применением операции свертки // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019663343, 15.10.2019. Заявка № 2019662073 от 01.10.2019.

18. Костров Б.В., Бастрычкин А.С. Сжатие изображений на основе ортогональных преобразований // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – № 9. – С. 113-119.

19. Гринченко Н.Н., Тарасов А.С., Тарасова В.Ю. Сверточная нейронная сеть для хэширования изображений // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019665048, 18.11.2019. Заявка № 2019664040 от 07.11.2019.

Статья поступила в редакцию 15.10.2023

Статья принята к публикации 15.12.2023

УДК 004.4

EDN: HVJSYG

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ МЕТОДОВ СИНТЕЗА СЕРВЕРНОЙ ЧАСТИ ПРИЛОЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ *CRUD*-АБСТРАКЦИЙ

© Автор(ы) 2023

ORCID: 0009-0006-8217-6502

РЫБКИН Денис Андреевич, студент кафедры «Системы автоматизированного проектирования»

Пензенский государственный университет

(440026, г. Пенза, ул. Красная, 40, e-mail: rybkin.denis.94@gmail.com)

SPIN: 1886-5231

AuthorID: 712065

ORCID: 0000-0001-6274-269X

ResearcherID: A-8677-2014

ПОДМАРЬКОВА Екатерина Михайловна, кандидат технических наук,

доцент кафедры «Системы автоматизированного проектирования»

Пензенский государственный университет

(440026, г. Пенза, ул. Красная, 40, e-mail: kalibryk.m@gmail.com)

Аннотация. Создание подхода к разработке универсальных методов синтеза серверной части приложений на основе абстракций является сложной задачей, решение которой позволит минимизировать временные и материальные затраты на создание и сопровождение программного продукта. Её актуальность определяется высокими требованиями к производительности серверного приложения при выполнении *CRUD*-операций, его надежности и безопасности, а также скорости разработки. Универсальность предметной области достигается путем использования абстракций при определении классов, реализующих базовые методы чтения и модификации данных. Прибегая к одному из свойств объектно-ориентированного программирования, абстрагированию, мы обособляем некоторые участки кода, делая разработку более оптимальной и безопасной. Декомпозиция кода дает возможность логическим единицам кода работать независимо. Кроме того, абстрагирование концепции *ORM* (*Object Relational Mapping* – объектно-реляционное отображение), которая уже является абстракцией, позволяет упростить и структурировать процесс взаимодействия серверной части с используемой базой данных, что существенно снижает трудозатраты программистов.

Ключевые слова: серверная часть, приложение, абстракции, декларативный подход, модель, контроллер, фреймворк, документирование, *api*, *orm*, *crud*, *swagger*.

DEVELOPMENT OF AUTOMATED METHODS FOR SYNTHESIS THE SERVER SIDE OF APPLICATIONS BASED ON *CRUD* ABSTRACTIONS

© The Author(s) 2023

RYBKIN Denis Andreevich, student of the Department of Automated Design Systems

Penza State University

(440026, Russian, Penza, Krasnaya Street, 40, e-mail: rybkin.denis.94@gmail.com)

PODMARKOVA Ekaterina Mikhailovna, candidate of technical sciences,

associate professor of the Department of Automated Design Systems

Penza State University

(440026, Russian, Penza, Krasnaya Street, 40, e-mail: kalibryk.m@gmail.com)

Abstract. The article is devoted to solving the complex problem of creating universal methods for synthesizing the server side of applications based on abstractions. Solving this problem will minimize the time and material costs of creating and maintaining a software product. The relevance is determined by the high requirements for the performance of the server application when performing *CRUD* operations, its reliability and security, as well as the speed of development. Universality is achieved by using abstractions when defining classes that implement basic methods for reading and modifying data. Using abstraction, one of the properties of object-oriented programming, we isolate certain sections of the code, making development more optimal and safer. Code decomposition allows logical units of code to operate independently. Also, abstracting the concept of *ORM* (*Object Relational Mapping*), which is also an abstraction, allows us to simplify and structure the process of interaction between the server side and the database used, which significantly reduces labor costs for programmers.

Keywords: server side, application, abstractions, declarative approach, model, controller, framework, documentation, *api*, *orm*, *crud*, *swagger*.

Для цитирования: Рыбкин Д.А. Разработка автоматизированных методов синтеза серверной части приложений на основе *CRUD*-абстракций / Д.А. Рыбкин, Е.М. Подмарькова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 12. – № 4(64). – С. 111-117. – EDN: HVJSYG.

Введение. Разработка автоматизированных методов синтеза серверной части приложений возможна за счет введения абстракций, смещающих акцент процесса разработки приложения к декларативному подходу [1-3]. При этом решаются следующие основные задачи:

– Предоставление возможности добавления CRUD-модель ориентированных операций (*CRUD* – *Create, Read, Update, Delete* – операции создания, чтения, модификации и удаления данных), не разрабатывая их вручную. Пример: *GET “/<entity>”*, *GET “/<entity>/<id>”*, *POST “/<entity>”*, *PUT “/<entity>/<id>”*, *PATCH “/<entity>/<id>”*, *DELETE “/<entity>/<id>”*, *GET “/<entity>/autocomplete”*, *GET “/<entity>-short”*, *GET “/<entity>-short/<id>”*, где *entity* – это название модели, например *user* или *post*, *id* – номер уникального идентификатора [4-9]. Все они решают проблему скорости разработки, последние два – опциональны, а последние три частично решают проблему производительности.

– Ограничение доступа к *CRUD*-операциям путем настроек уровней доступа *API*-адресов. Например, проверка авторизации пользователя, проверка прав доступа на основе роли пользователя в базе данных, например *user*; *admin* или *owner*, проверка эквивалентности между *id* пользователя, отправившего запрос на изменение модели, и условной *id* изменяемой модели, например, чтобы модель условного сообщения мог редактировать только пользователь, которым оно было создано (решает проблему безопасности).

– Автоматическая трансформация и валидация параметров *URI*. Например, из *URI “/entity/<id>”* нужно будет извлечь *id* и привести его целочисленному типу для дальнейшей отработки логики сервера.

– Автоматическая валидация и трансформации *query*-параметров. Например, для параметров: “*?title.like=москва&createdByUserId.gt=14*” будет проведена проверка на наличие полей “*title*” и “*createdByUserId*” в запрашиваемой модели, а также автоматическое приведение типов, то есть *14* станет целочисленным типом, а *title* станет строкой.

– Автоматическая валидация тела запроса.

– Предоставление функционала автоматического разбиения на страницы для *GET* запросов через *query*-параметры. Например, параметры “*?page=5&pageSize=10*” сервер обработает и будет искать строки в базе данных именно по такой структуре.

– Автоматическое документирование функционала в *swagger* (решает проблему документирования).

– Расширение базовой логики абстракций.

– Добавление условий фильтрации и сортировки для *GET*-запросов. Например, в контроллер *User* по умолчанию можно внедрить условия для фильтрации: *age >= 18*.

– Автоматическая синхронизация между параметрами *GET*-запросов и логикой фильтрации с сортировкой получаемых элементов. Например,

условия для поиска сообщений *API*-адреса *GET “/post/?title.like=москва&createdByUserId.gt=14”* будет заголовок, в котором, содержится подстрока: “*москва*” и *id* создателя поста – *14*.

– Обработка исключений и приведение всех исключений к конкретному типу. Сервер при любой ошибке будет помещать в тело ответа объект определенной структуры, что окажется весьма полезным для обработки возникшей ошибки на стороне клиента.

Перечисленные задачи закрывают предложенные абстракции. Создание на их основе веб-сервера позволяет существенно ускорить время разработки и автоматически документировать *API* приложения. Таким образом, стоит отметить, что предложенные абстракции никак не ограничивают возможности реализации пользовательской логики, а непосредственно разработка приложения сводится больше к декларативному подходу.

Методология. В основе идеи применения абстрактного модельно ориентированного сервиса чтения и модификации данных лежит универсальный механизм получения и модификации данных на основе динамической зависимости, в виде класса модели *ORM* [10-13], объявляющегося пользователем. Основным назначением данного механизма является реализация методов получения и модификации данных на основе внедренной зависимости, благодаря которой достигается универсальность предметной области абстракции. Таким образом, данный механизм является оберткой над внедренной зависимостью, предоставляющий конкретные, часто используемые методы получения и модификации данных. То есть абстракция над внедренной абстракцией. Для такой задачи стоит выделить основные 3 абстракции:

1. Абстрактный сервис чтения (*BaseServiceRead*);

2. Абстрактный сервис чтения оптимизированных данных (*BaseServiceReadShort*, наследуется от *BaseServiceRead*);

3. Абстрактный сервис создания, чтения, обновления и удаления данных (*BaseServiceCRUD*, наследуется от *BaseServiceRead*).

Сервис из первого пункта реализует следующие методы:

– *getAll(pagingOpts, filterOpts): IPaging<T>* (получить коллекцию моделей);

– *getById(id): T* (получить модель по уникальному идентификатору);

– *autocomplete(pagingOpts, orderOpts, filterOpts): IPaging<IAutocomplete>*.

Сервис из второго пункта наследуется от сервиса из первого пункта и реализует следующие методы:

– *getAll(pagingOpts, orderOpts, filterOpts): IPaging<TShort>*;

– *getByIdShort(id): TShort*.

Сервис из третьего пункта наследуется от сервиса из первого пункта и реализует следующие методы:

– *create(dto): T*;

```

– update(dto): T;
– updatePartially(dto): T;
– delete(id) : int.

```

Поле “*pagingOpts*” имеет следующий тип данных:

```

interface IPagingOptions {
  page: number
  pageSize: number
  order: OrderType
  orderBy: string
}

```

где “*page*” – это номер запрашиваемой страницы, “*pageSize*” – размер запрашиваемой страницы, *order* – направление сортировки, *orderBy* – поле модели для сортировки. Параметр “*filterOpts*” имеет тип *WhereOptions*, который является внутренним типом ORM “*Sequelize*” и описывает структуру объекта фильтрации для запрашиваемых моделей.

Тип “*T*”, наследуемый от базовой модели *ORM*, является шаблонным классом (джинериком) абстрактного сервиса.

Тип “*TShort*” является шаблоном классом абстрактного сервиса “*BaseServiceRaedShort*”, описывающий сжатую модель, возвращаемую методами данной абстракции.

Тип “*IPaging*” имеет следующий тип данных:

```

type IPaging<T> = {
  pagingOptions: IPagingOptions
  totalItems: number
  totalPages: number
  items: T[]
}

```

где “*pagingOptions*” – это параметры разбиения на страницы, с которыми был выполнен запрос на получения данных, *totalItems* – общее количество строк в запрашиваемой таблицы базы данных, “*totalPages*” – количество страниц с их запрашиваемым размером, *items* – массив полученных моделей.

Тип *IAutocomplete* имеет следующий тип данных:

```

export interface IAutocomplete {
  id: number
  text: string
}

```

Предлагаемый программный код типизации абстрактных сервисов:

```

BaseServiceRead
import { Includeable, WhereOptions }
from 'sequelize'
import { Model, Repository } from 'sequel-
elize-typescript'
import { IAutocomplete, IPaging, IPagin-
gOptions, Order } from '../..../common'

export interface IConfigServiceRead<T ex-
tends Model<T, any>> {
  modelRepository: Repository<T>
  autocompleteProperty: string
  includes?: Includeable[]
  whereOpts?: WhereOptions<T>
  orderOpts?: Array<string, Order>
  whereOptsFactory?: () => WhereOptions
}

```

```

export abstract class BaseServiceRead<T
extends Model<T, any>> {
  protected constructor(protected readon-
ly config: IConfigServiceRead<T>) {}
  abstract getById(id: number): Promi-
se<T>
  abstract getAll(
    pagingOptions: IPagingOptions,
    filterOpts: WhereOptions
  ): Promise<IPaging<T>>
  abstract autocomplete(
    opts: IPagingOptions,
    filterOpts: WhereOptions
  ): Promise<IPaging<IAutocomplete>>
}

```

где интерфейс “*IConfigServiceRead*” описывает тип настроек данных, внедрившегося через конструктор класса сервиса.

Оptionальное поле “*includes*” интерфейса “*IConfigServiceRead*” является массивом объектов, описывающих логику *JOIN*-моделей, имеющих связь с исходной таблицей.

Поле “*modelRepository*” интерфейса “*IConfigServiceRead*” является классом, описывающим модель таблицы базы данных и реализующим методы получения и модификации данных за счет наследования от абстракции *ORM*.

Поле “*autocompleteProperty*” интерфейса “*IConfigServiceRead*” является именем поля модели, которое будет заменено на поле “*text*” в типе данных “*IAutocomplete*”, массив которых будет возвращать метод “*autocomplete*” сервиса *BaseServiceRead*.

Оptionальное поле “*orderOpts*” интерфейса “*IConfigServiceRead*” является матрицей условий сортировки запрашиваемых моделей. В последующем они будут применяться к методам “*getAll*” и “*autocomplete*”.

Оptionальное поле “*whereOpts*” является объектом, описывающим условия фильтрации запрашиваемых моделей. В последующем они будут применяться к методам “*getAll*”, “*getAllShort*” и “*autocomplete*”.

Оptionальное поле “*whereOptsFactory*” является функцией обратного вызова, возвращающей объект, описывающий условия фильтрации запрашиваемых моделей. Функция нужна для динамического добавления условий фильтраций. Это полезно, например, когда условия фильтраций нужно добавить, исходя из полей модели пользователя, отправившего запрос.

BaseServiceReadShort

```

BaseServiceReadShort
export interface IConfigServiceReadShort<
T extends Model<T, any>,
TShort extends ModelWithId
> extends IConfigServiceRead<T> {
  mapper: (fullModel: T) => TShort
}

export abstract class BaseServiceReadS-
hort<
  T extends Model<T, any>,
  TShort extends ModelWithId
> extends BaseServiceRead<T> {

```

```

    protected constructor(
      protected readonly config: IConfigServiceReadShort<T, TShort>
    ) {
      super(config)
    }
    abstract getShortById(id: number): Promise<TShort>
    abstract getAllShort(
      pagingOptions: IPagingOptions,
      filterOpts: WhereOptions
    ): Promise<IPaging<TShort>>
  }

```

где поле *“mapper”* интерфейса *“IConfigServiceReadShort”* является функцией обратного вызова, которая принимает на вход модель данных строки таблицы базы данных, а на выход отдаёт сжатую модель.

BaseServiceCRUD

```

export interface IConfigServiceCRUD<T extends Model<T, any>>
  extends IConfigServiceRead<T> {}

export abstract class BaseServiceCRUD<
  T extends Model<T, any>
> extends BaseServiceRead<T> {
  protected constructor(protected readonly config: IConfigServiceCRUD<T>) {
    super(config)
  }
  abstract create(
    model: MakeNullishOptional<T['_creationAttributes']>
  ): Promise<T | null>
  abstract update(id: number, model: T): Promise<T | null>
  abstract updatePartially(id: number, model: Partial<T>): Promise<T | null>
  abstract delete(id: number): Promise<number>
}

```

При этом программный код реализации перечисленных абстрактных сервисов может выглядеть следующим образом:

BaseServiceRead

```

export abstract class BaseServiceRead<T extends Model<T, any>>
  implements AbstractServiceRead<T>
{
  protected constructor(protected readonly config: IConfigServiceRead<T>) {}

  public async getAll(
    pagingOptions: IPagingOptions = defaultPagingOptions,
    filterOpts: WhereOptions<T>
  ): Promise<IPaging<T>> {
    const { count, rows } = await this.config.modelRepository.findAndCountAll({
      ...PaginationHelper.genPagingOpts(-pagingOptions),
      order: (this.config.orderOpts ?? []).concat([
        [pagingOptions.orderBy, pagingOptions.order]
      ]) as SequelizeOrder,
      where: Object.assign(
        filterOpts,
        this.config.whereOpts,
        this.config.whereOptsFactory?.()
      )
    })

    return PaginationHelper.mapToIPaging<IAutocomplete>(
      count,
      rows as unknown as IAutocomplete[],
      pagingOptions
    )
  }
}

```

```

    ]) as SequelizeOrder,
    where: Object.assign(
      filterOpts,
      this.config.whereOpts,
      this.config.whereOptsFactory?.()
    ),
    include: this.config.includes
  })
  return PaginationHelper.mapToIPaging<T>(count, rows, pagingOpts)
}
public async getById(
  id: number,
  rejectOnEmpty: Nullable<Error> = null
): Promise<T> {
  return await this.config.modelRepository.findByPk(id, {
    include: this.config.includes,
    rejectOnEmpty:
      rejectOnEmpty ??
      new NotFoundException(
        ErrorMessagesConstants.NotFound,
        `No such ${this.config.modelRepository.name}`
      )
  })
}
public async autocomplete(
  pagingOptions: IPagingOptions = defaultPagingOptions,
  filterOpts: WhereOptions
): Promise<IPaging<IAutocomplete>> {
  const { count, rows } = await this.config.modelRepository.findAndCountAll({
    ...PaginationHelper.genPagingOpts(-pagingOptions),
    attributes: ['id', [this.config.autocompleteProperty, 'text']],
    order: (this.config.orderOpts ?? []).concat([
      [pagingOptions.orderBy, pagingOptions.order]
    ]) as SequelizeOrder,
    where: Object.assign(
      filterOpts,
      this.config.whereOpts,
      this.config.whereOptsFactory?.()
    )
  })

  return PaginationHelper.mapToIPaging<IAutocomplete>(
    count,
    rows as unknown as IAutocomplete[],
    pagingOptions
  )
}
}

```

BaseServiceReadShort

```

export abstract class BaseServiceReadShort<
  T extends Model<T, any>,
  TShort extends ModelWithId
>

```

```

    extends BaseServiceRead<T>
    implements AbstractServiceReadShort<T,
TShort>
    {
        protected constructor(
            protected readonly config: IConfigSer-
viceReadShort<T, TShort>
        ) {
            super(config)
        }

        public async getAllShort(
            pagingOpts: IPagingOptions = default-
PagingOptions,
            filterOpts: WhereOptions
        ): Promise<IPaging<TShort>> {
            const result = await this.getAll(pagin-
gOpts,filterOpts)
            return { ...result,items:result?.items.
map(this.config.mapper) }
        }

        public async getShortById(id: number):
Promise<TShort> {
            return this.config.mapper(await this.
getById(id))
        }
    }

```

BaseServiceCrud

```

export abstract class BaseServiceCRUD<T
extends Model<T, any>>
    extends BaseServiceRead<T>
    implements AbstractServiceCRUD<T>
    {
        protected constructor(protected readon-
ly config: IConfigServiceCRUD<T>) {
            super(config)
        }

        public async create(model: MakeNullis-
hOptional<T['_creationAttributes']>) {
            return this.config.modelRepository.
create(model)
        }

        public async update(id: number, model:
T) {
            return (
                await this.config.modelRepository.
update(model, {
                    where: {
                        id
                    },
                    returning: true,
                    plain: true
                })
            ) [1] as unknown as T
        }

        public async updatePartially(id: num-
ber, model: Partial<T>) {
            return (
                await this.config.modelRepository.
update(model, {

```

```

                where: {
                    id
                },
                returning: true,
                plain: true
            })
        ) [1] as unknown as T
    }

    public async delete(id: number): Promi-
se<number> {
        return this.config.modelRepository.
destroy({ where: { id } })
    }
}

```

Таким образом, мы получаем универсальные сервисы, решающие задачи абстрактного чтения, создания, обновления и удаления данных. Почти полная универсальность сервисов достигается за счет внедрения настроек зависимостей, которые влияют на логику построения запроса к базе данных [14, 15].

Результаты. После определения абстрактных сервисов идёт этап разработки контроллеров. Контроллер – это класс, привязанный к определенному *URI*, методы которого реализуют некоторую логику по обработке *HTTP*-запроса. То есть необходимость обработки входящих *HTTP*-запросов лежит в основе применения абстрактного контроллера. Обработка запросов производится из внедренного абстрактного сервера. Таким образом, контроллер является абстракцией, повторно использующей другую абстракцию, а в некоторых случаях еще и наследующейся от другой абстракции.

Задачи предложенных абстрактных контроллеров:

- обработка входящих запросов на основе внедренного абстрактного сервиса;
- автоматическое документирование *API*-адресов контроллера с возможными входными параметрами и выходными ответами;
- автоматическая валидация тела запросов;
- автоматическая валидация и приведение типов *query*-параметров;
- автоматическая синхронизация между *query*-параметрами и условиями фильтрации, сортировки и разбиения на страницы в *GET*-запросах к базе данных;
- конфигурация настроек приватности *API*-адресов на основе внедренных в контроллер объекта параметров (проверка авторизации пользователя, проверка прав доступа на основе роли пользователя в базе данных, проверка эквивалентности между *id* пользователя, отправившего запрос на изменение модели, и условной *id* изменяемой модели);
- реализация оптимизированных абстрактных *GET*-запросов.

Для реализации данных задач стоит выделить 3 абстрактных контроллера:

1. Абстрактный контроллер получения данных (*BaseControllerRead*).

2. Абстрактный контроллер получения оптимизированных данных (*BaseControllerReadShort*).

3. Абстрактный контроллер получения и модификации данных (*BaseControllerCRUD*).

Стоит отметить, что роль связывания любого абстрактного контроллера с абстрактным сервисом выполняют механизмы *DI* (*Dependency Injection*) фреймворка *Nest.js*.

Обработчики API-адресов реализованы в отдельном классе контроллера по причине опциональной необходимости данного функционала. То есть разработчику предоставляется возможность самому принимать решения о необходимости данной оптимизации в зависимости от количества полей в модели данных.

Обсуждение. Если сравнивать предлагаемый подход с уже имеющимися решениями, то можно выделить две библиотеки, имеющих сходное назначение [16, 17]:

– *abstractorModule* (<https://github.com/guojianlan/abstractorModule>),

– *nestjsx* (<https://github.com/nestjsx/crud>).

Преимущества первой из них заключаются в том, программный код оформлен в виде отдельной библиотеки и легко интегрируются со многими проектами через *NPM* (*Node Package Manager* – менеджер пакетов, входящий в состав *Node.js*). К недостаткам же можно отнести следующее:

– отсутствие обработчиков для API-адресов чтения оптимизированных данных;

– не реализована интеграция с библиотекой *swagger*, то есть нет возможности автоматического документирования;

– не реализована валидация и трансформация *query*-параметров, то есть не реализован функционал автоматической фильтрации и сортировки, реализовано только разбиение на страницы;

– не реализовано связывание таблиц в запросах на чтение данных;

– на базовом уровне не реализовано всё то, что связано с защитой данных – проверка авторизации, проверка прав на обновление и т.д.

Также из особенностей можно указать то, что библиотека работает с другой *ORM* под названием *TypeOrm* (она является более низкоуровневой в плане работы с запросами к базам данных, но, в то же время, у неё менее удобный интерфейс работы с запросами, чем у «*Sequelize*», используемой в работе).

Вторая библиотека от компании *nestjsx* имеет уже перечисленные преимущества, а также немного более удобный интерфейс для пользователя. Из её недостатков наиболее существенными являются отсутствие настроек безопасности для API-адресов, а также неоптимальный подход к авторизации (и проверки наличия авторизации) пользователей, выполняющейся посредством модификации исходных запросов. Более предпочтительным вариантом является описанный в данной статье подход, основанный на использовании инструмента *Nodejs* –

AsyncLocalStorage. Принцип его работы заключается в создании общего контекста или небольшого хранилища на уровне одной «цепочки промисов» (*promise chains*), в результате чего в это хранилище можно помещать или извлекать данные. Т.е. на уровне одной цепочки вызовов асинхронных функций, коим является один обработчик запросов, вызывается другой асинхронный метод, который внутри себя вызывает следующий асинхронный метод и так далее по цепочке. В итоге получается, что на уровне одной такой цепочки выполняются параллельные операции чтения и записи данных хранилище.

Выводы. В настоящее время практически ни один коммерческий IT-проект не обходится без серверной логики приложения. Высокие требования к производительности, надежности, безопасности, документированию и скорости разработки делают актуальной проблему создания подхода к разработке универсальных методов синтеза серверной части на основе абстракций [18, 19].

Приведенный в данной статье программный код написан на языке *TypeScript* [20], который, в конечном счете, компилируется в *JavaScript*, исполняющийся в среде *Nodejs*. Абстракции разработаны на основе *API ORM* «*Sequelize*», реализующем базовые методы чтения и модификации данных, фреймворка «*Nestjs*», предоставляющего функционал разработки *HTTP*-сервера, а также библиотеки «*@nestjs/swagger*» для документирования *API*.

Основным результатом работы является серверное приложение на основе предложенных абстракций для *CRUD*-операций. Универсальность предметной области разработки достигается путем определения классов, используемых абстракциями для валидации запросов, а также классов моделей *ORM* «*Sequelize*», реализующих базовые методы чтения и модификации данных.

Разработанные абстракции применимы к широкому кругу прикладных задач. В результате их применения разработка приложений существенно сокращается по времени, выполняется автоматическое документирование *API* приложения, повышается надежность и безопасность базового функционала, реализуется функциональность производительных *GET*-запросов (*GET* “/entity/autocomplete”, *GET* “/entity-short”, *GET* “/entity-short/<id>”), т.к. они возвращают сокращенные данные, что, в свою очередь, позитивно влияет на скорость передачи данных. Это позволяет минимизировать временные и материальные затраты на сопровождение программного продукта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Роберт Мартин: Чистая архитектура. Искусство разработки программного обеспечения, 2022.
2. Фаулер М. Шаблоны корпоративных приложений. М.: И.Д. Диалектика-Вильямс, 2019, 546 с.
3. ASP.NET MVC Pattern [электронный ресурс] / URL: <https://dotnet.microsoft.com/en-us/apps/aspnet/mvc> (дата обращения 12.10.2023).
4. Рыбанов А.А. *CRUD*-модель безопасности как

базовый элемент контроля и управления доступом к данным в информационных системах // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. 2022. №4 (311). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/crud-model-bezopasnosti-ka-k-bazovyyu-element-kontrolya-i-upravleniya-dostupom-k-dannym-v-informatsionnyh-sistemah> (дата обращения: 18.10.2023).

5. *CRUD operations explained: Create, read, update, and delete* [электронный ресурс] / URL: <https://www.educative.io/blog/crud-operations> (дата обращения 8.10.2023).

6. Angel Ninov; Dynamic code generation for *CRUD* operations in web development. AIP Conf. Proc. 6 September 2022; 2505 (1): 060002. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0101125> (дата обращения: 18.10.2023).

7. Asyraf Wahi Anuar, Nazri Kama, Azri Azmi, Hazlifah Mohd Rusli and Yazriwati Yahya, "Re-*CRUD* Code Automation Framework Evaluation using DESMET Feature Analysis" International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA), 13(5), 2022.

8. Michail Pantelelis and Christos Kalloniatis. 2023. Mapping *CRUD* to Events - Towards an object to event-sourcing framework. In Proceedings of the 26th Pan-Hellenic Conference on Informatics (PCI '22). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 285–289.

9. Shagun Bakliwal, Hands-on Application Development using Spring Boot: Building Modern Cloud Native Applications by Learning RESTful API, Microservices, *CRUD* Operations, Unit Testing, and Deployment, BPB Publication, 2021.

10. Технология объектно-реляционного отображения в построении современных приложений – ORM [электронный ресурс] / URL: <https://doi.org/10.36906/AP-2022> (дата обращения 8.10.2023).

11. А.М. Дергачев, И.О. Жирков, И.П. Логинов, Ю.Д. Кореньков Реализация метаязыковой абстракции для поддержки ООП средствами языка Си // Программные продукты и системы. 2019. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/realizatsiya-metayazykovoy-abstraktsii-dlya-podderzhi-ki-oor-sredstvami-yazyka-si> (дата обращения: 18.10.2023).

12. D. Colley, C. Stanier and M. Asaduzzaman, "The Impact of Object-Relational Mapping Frameworks on Relational Query Performance," 2018 International Conference on Computing, Electronics & Communications Engineering (ICCECE), Southend, UK, 2018, pp. 47-52.

13. Geetam Chawla, Navneet Aman, Raghavan Komondoor, Ashish Bokil, and Nilesh Kharat. 2022. Verification of ORM-based controllers by summary inference. In Proceedings of the 44th International Conference on Software Engineering (ICSE '22). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2340-235.

14. Дашук В.А., Намиот Д.Е. Сравнительный анализ моделей работы с данными в Java-приложениях // International Journal of Open Information Technologies. 2020. №7. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-modeley-raboty-s-dannymi-v-java-prilozheniyah> (дата обращения: 10.10.2023).

15. Байдыбеков А.А., Гильванов Р.Г., Молодкин И.А. Современные фреймворки для разработки WEB-приложений // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2020. №4 (24). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-freymvorki-dlya-razrabotki-web-prilozheniy> (дата обращения: 12.10.2023).

16. *abstractorModule* [электронный ресурс] / URL: <https://github.com/guojianlan/abstractorModule> (дата обращения: 12.10.2023).

17. *nestjsx* [электронный ресурс] / URL: <https://github.com/nestjsx/crud> (дата обращения: 12.10.2023).

18. Federico Kereki, Mastering JavaScript Functional Programming: Write clean, robust, and maintainable web and server code using functional JavaScript and TypeScript (3rd edition), Packt Publishing Limited, 2023.

19. Daniel Correa, Greg Lim, Practical Nest.js: Develop clean MVC web applications, 2022.

20. Файн, Я. Angular и TypeScript. Сайтостроение для профессионалов = Angular 2 Development with TypeScript / Я. Файн, А. Моисеев; пер. с англ. Н. Вильчинского, Е. Зазнобы. – Санкт-Петербург: Питер, 2018. – 464 с.

Статья поступила в редакцию 16.10.2023

Статья принята к публикации 15.12.2023

УДК 004.35

EDN: NABYUWJ

ЦИФРОВОЙ МОДУЛЬ РЕАЛИЗАЦИИ СТЫКА СИСТЕМНОЙ USB-ШИНЫ С БЛОКОМ БИИМПУЛЬСНОГО КОДИРОВАНИЯ

© Авторы 2023

SPIN: 3897-5570

AuthorID: 496097

ORCID: 0000-0002-2984-4480

КОСТРОВ Борис Васильевич, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Электронные вычислительные машины»

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина
(390005, Россия, Рязань, ул. Гагарина, д.59/1, e-mail: kostrov.b.v@evm.rsreu.ru)*

SPIN: 5470-1289

AuthorID: 650911

ORCID: 0000-0002-3358-4394

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

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

SPIN: 2177-7806

AuthorID: 644943

ORCID: 0000-0003-0989-3928

ТРОКОЗ Дмитрий Анатольевич, доктор технических наук, доцент, проректор по научной работе
Пензенский государственный технологический университет

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

SPIN: 7126-7682

AuthorID: 428445

ORCID: 0000-0003-3176-0531

САЛЬНИКОВ Игорь Иванович, доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Программирование»

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

Аннотация. Статья посвящена разработке цифрового конвертера, который соединяет системную USB-шину с блоком биимпульсного кодирования. В работе проводится обзор различных вариантов реализации этого устройства, включая использование микроконтроллеров и программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). В результате анализа характеристик микроконтроллеров от разных производителей установлено, что ни один из них не располагает встроенным аппаратным кодировщиком для требуемого интерфейса *C1-ФЛ-БИ*. Обоснован выбор для реализации конвертера программируемой вентиляционной матрицы *XC6SLX4* от *Xilinx* и аппаратного моста на базе микросхемы *FT245* обеспечивающего взаимодействие с персональным компьютером. Предлагаемое устройство способно осуществлять кодирование данных на стыке *C1-ФЛ-БИ*, подключение к компьютеру через шину *USB* и совместимость с *USB 2.0*. Проект верифицирован с использованием программы *ModelSim*, для тестирования алгоритма разработан испытательный стенд. Результаты моделирования, их сравнение с натурными данными подтверждают возможность практического применения проекта для объединения системной *USB*-шины с блоком биимпульсного кодирования. Предлагаемое устройство может найти применение в научной сфере и различных отраслях промышленности.

Ключевые слова: биимпульсное кодирование, интерфейс *USB*, микроконтроллер, ПЛИС, цифровой конвертер, *FIFO*, *ModelSim*, *VHDL*.

DIGITAL MODULE FOR REALIZATION OF SYSTEM USB-BUS JUNCTION WITH BIPULSE CODING BLOCK

© The Authors 2023

KOSTROV Boris Vasilyevich, doctor of technical sciences, professor, head of department of Electronic Computers
Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin

(390005, Russia, Ryazan, Gagarina str., 59/1, email: kostrov.b.v@evm.rsreu.ru)

MARTYSHKIN Alexey Ivanovich, candidate of technical sciences, docent, head of Programming Department
Penza state technological University

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

TROKOZ Dmitry Anatolyevich, doctor of technical sciences, docent,
vice-rector for scientific work, professor of Programming Department

Penza State Technological University

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

SALNIKOV Igor Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, professor of Programming Department

Penza State Technological University

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

Abstract. The paper is devoted to the development of a digital converter that connects the *USB* system bus to a bipulse coding block. The paper reviews various variants of this device implementation, including the use of microcontrollers and programmable logic integrated circuits (*PLICs*). The characteristics of microcontrollers from different manufacturers are analysed and it is found that none of them has a built-in hardware encoder for the *C1-FL-BI* interface required in this case. As a result, an *XC6SLX4 FPGA* from Xilinx and a hardware bridge based on *FT245* chip for interfacing with a personal computer are used for implementation. The proposed device provides data encoding at the *C1-FL-BI* junction, connects to a computer via *USB* and is compatible with *USB 2.0*. The design has been modelled using *ModelSim* software and a test bed has been developed to verify the performance of the algorithm. The simulation results are confirmed to be consistent with the performance of the device with real results, which confirms its practical applicability for integrating a *USB* system bus with a bi-pulse coding unit. The conclusion is drawn on the feasibility of the proposed device in various spheres and industries.

Keywords: bi-pulse encoding, *USB* interface, microcontroller, *FPGA*, digital converter, *FIFO*, *ModelSim*, *VHDL*.

Для цитирования: Костров Б.В. Цифровой модуль реализации стыка системной *USB*-шины с блоком биимпульсного кодирования / Б.В. Костров, А.И. Мартышкин, Д.А. Трокоз, И.И. Сальников // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 12. – № 4(64). – С. 118-126. – EDN: HABYWJ.

Введение. Современные приборы все чаще обходятся без специализированных устройств и материалов для записи и хранения информации, данные регистрируются и накапливаются на компьютерных носителях, что позволяет переносить, копировать, преобразовывать, обрабатывать, анализировать и интерпретировать их с использованием встраиваемых контроллеров и персональных компьютеров. Решающую роль играет программное обеспечение для записи, обработки и отображения данных [1, 2].

Цель данной работы заключается в разработке цифрового модуля для связи системной *USB*-шины передачи данных с блоком биимпульсного кодирования [3]. Кодирование данных по протоколу *C1-ФЛ-БИ* может выполняться с применением программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) типа программируемой вентильной матрицы *XC6SLX4* фирмы *Xilinx* в составе 10000 логических ячеек, а взаимодействие конвертера с персональным компьютером по интерфейсу *USB* версии 2.0 осуществляться высокоскоростным аппаратным мостом на микросхеме *FT245* [4, 5].

С этой целью ставится задача создания устройства для соединения персонального компьютера с

универсальной последовательной шиной *USB* и специализированной каналобразующей аппаратуры, обладающей интерфейсом, совместимым с модулем *C1-ФЛ-БИ*. При этом необходимо, чтобы на стороне ПЛИС осуществлялось кодирование потока информации по *C1-ФЛ-БИ* и обеспечивался обмен данными с персональным компьютером посредством аппаратного моста *USB-FIFO* [5, 6]. Устройство обязано обеспечивать скорость обмена данными через стык *C1-ФЛ-БИ* до 64000 бит/с с применением биимпульсного кодирования данных, а также быть совместимым со стандартом *USB 2.0* для связи с персональным компьютером [7].

Устройство реализовано на базе контроллера *USB-FIFO FT245* фирмы *FTDI* и ПЛИС *Spartan 6* фирмы *Xilinx*, проектирование осуществлено на языке *VHDL-1993*.

Методология. Существует несколько вариантов реализации биимпульсного кодирования стыка *C1-ФЛ-БИ* и стыка с шиной *USB*. По первому варианту роль активного элемента исполняет микроконтроллер (МК) [8] (рис. 1), в данной реализации ключевое значение имеет выбор МК с необходимыми функциональными возможностями.



Рисунок 1 – Реализации устройства на базе МК как активного элемента

Краткий обзор существующих микропроцессоров и микроконтроллеров, таких как широко известные модели *Atmel SAM3U*, *NXP LPC1347*,

Cypress CY7C68013A показывает, что ввиду специфичности стыка *C1-ФЛ-БИ* ни один из них не обладает встроенным аппаратным кодировщиком

для данного интерфейса [9]. Для их использования необходим программный кодировщик, введение которого приводит к некоторому снижению производительности и уменьшению числа обслуживаемых передающих каналов. В данном аспекте первые два из названных МК имеют преимущество в части использования каналов прямого доступа к памяти (*DMA*), в то время как МК *CY7C68013A* предоставляет разработчикам готовый набор программных решений, что упрощает задачу синтеза программного обеспечения.

Альтернативным решением представляется реализация модуля с применением в качестве активного элемента ПЛИС [10-12], его возможная конфигурация показана на рисунке 2. Число функциональных блоков здесь больше, один из блоков предназначен для информационного обмена по *USB*-шине и использует аппаратный *USB-FIFO*-мост от компании *FTDI*, другой блок служит для

хранения конфигурации ПЛИС. Микросхемы *FTDI*, хотя и уступают микросхемам серии *CY7C68013A* по некоторым техническим характеристикам, значительно превосходят их по стоимости. Также к достоинствам микросхемы *FTDI* можно отнести отсутствие необходимости в разработке программы контроллера (*firmware*).

Для решения многих задач необходимо написать драйвер для устройства, однако можно использовать и стандартные средства, например, драйверы устройств класса *HID*, а также драйверы устройств массового хранения данных.

Следует отметить, что использование стандартных драйверов не всегда обеспечивает удовлетворительную передачу данных. Проблем подобного рода можно избежать, используя аппаратные мосты *USB* и бесплатные драйверы ко всем распространенным семействам операционных систем (ОС) фирмы *FTDI*.



Рисунок 2 – Реализация устройства на базе ПЛИС как активного элемента

В данной реализации для формирования стыка *C1-ФЛ-БИ* используется ПЛИС семейства *Spartan-6* от компании *Xilinx*, ориентированные в отличие от семейства *Virtex* на применение в более экономичных секторах, таких как бытовая электроника, проводная и беспроводная связь. Количество логических ячеек на кристаллах *Spartan-6* варьируется от 3500 до 150000 [13], а напряжение питания составляет 1,2 В. Эти ПЛИС поддерживают множество стандартов ввода/вывода и включают блоки памяти (*Block RAM*) емкостью 18 кбит, которые можно настроить как два блока по 9 кбит. Семейство *Spartan-6* известно с 2009 года и по-прежнему является наиболее актуальным выбором для применения в областях, где важным фактором является стоимость. Таким образом, для синтеза устройства оправдано использование ПЛИС семейства *Spartan-6*, которая обладает тактовой частотой в сотни мегагерц, что вполне соответствует требованиям стыка *C1-ФЛ-БИ* блока биимпульсного кодирования с расширяемым числом обслуживаемых передающих каналов [14, 15]. Стык по шине *USB* выполняет аппаратный мост фирмы *FTDI*, это самое простое решение с точки зрения программной и аппаратной реализации, не требующее разработки драйверов устройств и написания программы контроллера.

Структура представленного на рисунке 2 цифрового конвертера включает в себя следующие компоненты: аппаратный мост *USB-FIFO FT245R*; ПЛИС *XC6SLX4*; конфигурационное программируемое запоминающее устройство (ПЗУ) *XCFO4S* емкостью 4 Мбит; генератор с частотой 50 МГц; приемник и передатчик последовательных данных. Задача ПЛИС состоит в кодировании потока информации на стыке с блоком биимпульсного кодирования и в обмене данными с компьютером через мост *USB-FIFO* по 8-битной шине. Схема приемника и передатчика последовательных данных для гальванически развязанных магистралей через трансформаторную связь преобразует сигналы двухпроводного канала передачи данных стандарта *C1-ФЛ-БИ* в логические сигналы. При включении питания контроллера автоматически происходит загрузка прошивки ПЛИС из конфигурационного ПЗУ. Для управления устройством и осуществления обмена данными с персональным компьютером необходим контроллер в виде высокоскоростного аппаратного моста, реализующего интерфейс *USB* версии 2.0, например, аппаратный мост *FTDI*. Для реализации в ПЛИС блоков контроллера и организации взаимодействия внешнего аппаратного моста с кодером/декодером сигналов стыка *C1-ФЛ-БИ* по принципу *FIFO* (*Fir-*

st In – First Out) используется ПЛИС типа *FPGA* (*Field Programmable Gate Array* – программируемая полем вентиляционная матрица) [16-18]. Построенные на базе *SRAM*-технологии *FPGA* требуют процедуры конфигурирования как при каждом включении питания, так и после инициализации системы или

при обновлении конфигурационных данных. Для сохранения конфигурации используется ПЗУ, которое в системе можно программировать через 4-пиновый *JTAG*-интерфейс.

Функциональная схема, построенная с учетом названных факторов, представлена на рисунке 3.

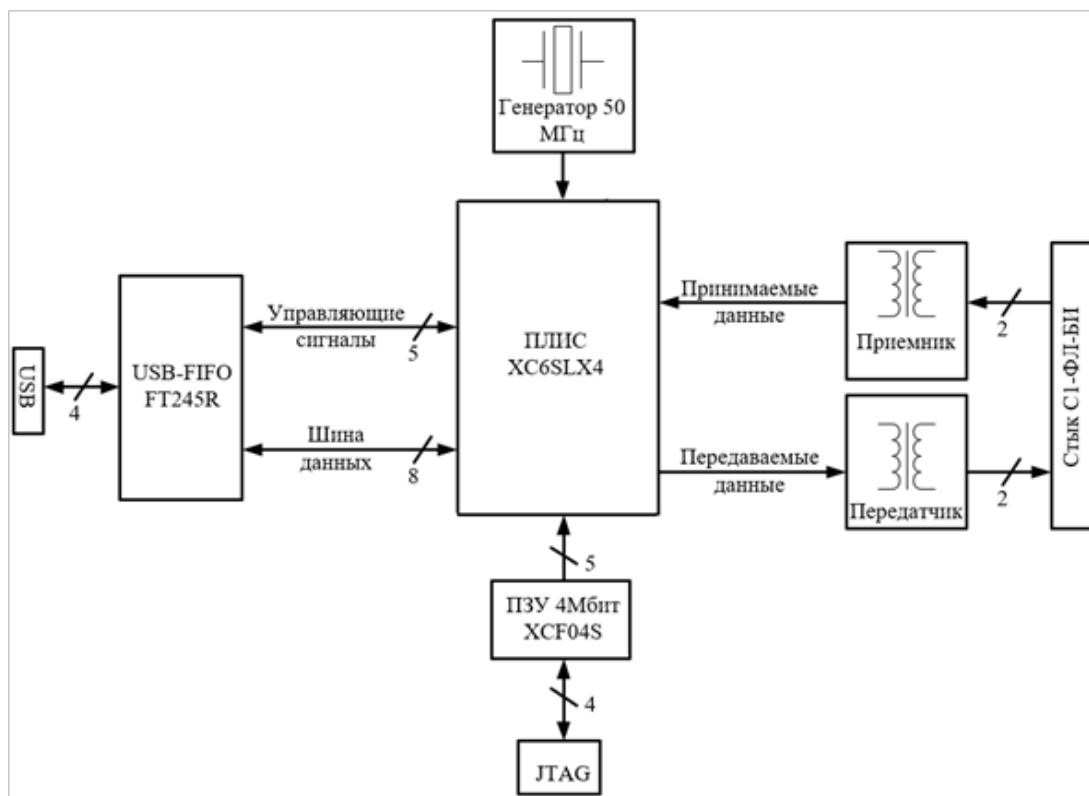


Рисунок 3 – Функциональная схема устройства

Основной элемент устройства – ПЛИС, которая осуществляет управление контроллером *USB* и схемой сопряжения стыка *C1-ФЛ-БИ* [19]. В качестве контроллера универсальной шины используется микросхема *FT245R* фирмы *FTDI* обеспечивающей подключение к ПЭВМ по шине *USB* версии 2.0 и обладающая следующими свойствами: тип моста – преобразование *USB-FIFO*; встроенная память *EEPROM* 1КБ; напряжение питания (3,3 ... 5,5) В; рабочая температура от –40 до 85°C; корпус *SSOP28*.

Микросхема *FT245R* – однокристалльный преобразователь интерфейса *USB* в параллельный интерфейс *FIFO* двунаправленной передачи данных. Весь протокол *USB* обрабатывается на кристалле и не требует специальных прошивок. Преобразователь *FT245R* обеспечивает скорость передачи данных до 8 Мбит/с. Для достижения максимальной пропускной способности управление устройством и передача данных осуществляется по двум независимым каналам типа *FIFO*. Асинхронный интерфейс *FIFO FT245* может быть сконфигурирован только для канала *A* и канала *B*. Асинхронный *FIFO*-интерфейс работает аналогично синхронному, за исключением лишь того, что операции записи/чтения происходят по фронту сигналов *WR#* и *RD#* соответственно. В

этом режиме отсутствует сигнал *CLKOUT* и не требуется входной сигнал *OE#*.

На рисунке 4 представлены временные диаграммы, демонстрирующие работу асинхронного режима *FIFO*.

Для обеспечения интерфейса между ПЛИС и контроллером *USB*-шины используется 8-разрядная шина данных, передача данных по которой осуществляется в режиме асинхронного *FIFO*. Для установления связи с ПЛИС применяется восемь битов данных. Кроме того, для передачи сигналов чтения (*RD*) и записи (*WR*) используются две линии, используются также две линии для передачи статуса приемного (*RXF*) и передающего (*TXE*) буферов. На рисунке 5 представлена схема соединения ПЛИС с контроллером.

Если линия *RXF* находится в состоянии логического «0», то в буфере приема есть хотя бы один байт, т.е. компьютер уже что-то передал, тогда для его считывания необходимо переключить сигнал *RD* из «1» в «0», и один байт появится на выводах шины данных. На рисунке 6а приведены временные диаграммы цикла чтения. Если *TXE* находится в состоянии «1», то буфер передачи заполнен полностью, поэтому перед тем, как

передать компьютеру очередной байт, необходимо подождать, когда освободится место в очереди. Для отправки данных в компьютер следует выставить

байт на выводах шины и переключить сигнал *WR* из логической «1» в логический «0». Временные диаграммы цикла записи представлены на рисунке 6б.

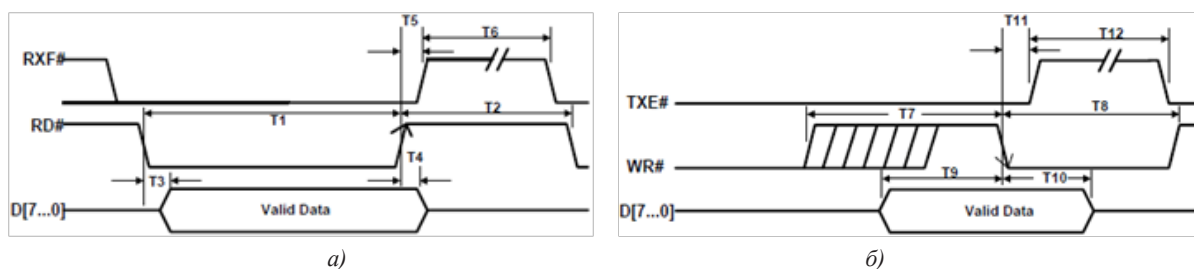


Рисунок 4 – Временная диаграмма сигналов интерфейса асинхронного FIFO в режиме чтения (а) и в режиме записи (б)

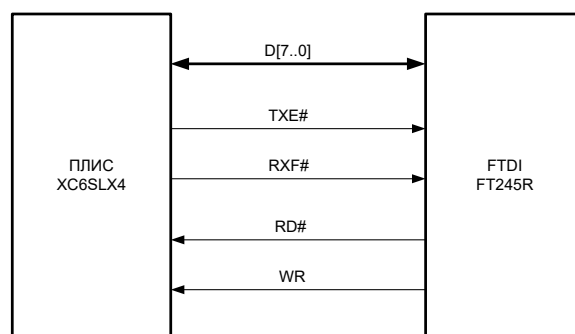


Рисунок 5 – Схема соединения ПЛИС с контроллером

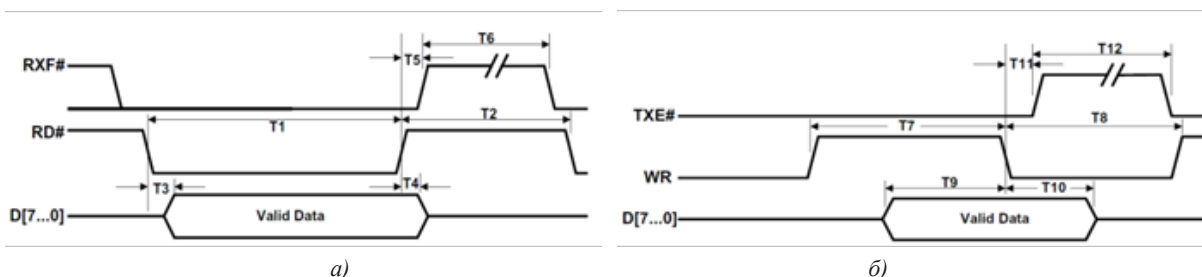


Рисунок 6 – Временные диаграммы цикла чтения (а) и цикла записи (б)

Результаты. Проектирование выполнялось с использованием САПР *ISE Design Suite 12*, включающей в себя следующие файлы [20]:

gen_mod.vhd. Верхнеуровневый модуль основного уровня проекта, к портам которого привязываются соответствующие выходы ПЛИС. Модуль содержит блок кодирования биимпульсного сигнала, блок декодирования биимпульсного сигнала, контроллер блоков кодирования/декодирования и контроллер *USB-FIFO*;

ft245.vhd. Модуль контроллера *USB-FIFO*, который содержит описание конечного автомата, реализующего взаимодействие с внешней микросхемой *FT245* по принципу *FIFO*;

tx_c1fl.vhd. Модуль кодирования данных в биимпульсный код и выдачи на передатчик стыка *C1-ФЛ-БИ*;

rx_c1fl.vhd. Модуль декодирования данных биимпульсного кода, принятого с приемника стыка *C1-ФЛ-БИ*;

ctrl_c1fl.vhd. Модуль управления кодером/декодером данных. По управляющей команде он включает прием и/или передачу данных и устанавливает скорость потока данных;

testbench.vhd. Испытательный стенд представляет собой специализированную программу на языке описания аппаратуры *VHDL*, формирующую верхний уровень иерархии модели. Эта программа определяет последовательность сигналов на выводах основного модуля (*gen_mod.vhd*), необходимую для проверки устройства.

На рисунке 7 представлено графическое представление управляющего автомата.

У управляющего автомата имеется шесть состояний. После снятия сигнала сброса устанавливается начальное состояние *IDLE* ожидания следующей транзакции. Активизация *rxf*-сигнала указывает на разрешение чтения данных из микросхемы моста *USB-FIFO*, что приводит к переходу в состояние *READ_DATA*, когда проис-

ходит запуск отсчета интервала *RDWAIT* для чтения гарантированных данных с шины. По окончании отсчета интервала происходит переход в следующее состояние *WAIT_RD2RD*, после чего прочитанные данные заносятся в буферный регистр, и активизируется цикл передачи их внутренним модулям. В состоянии *WAIT_RD2RD* происходит отсчет времени, необходимого для завершения текущей транзакции чтения *FIFO* и началом новой. По окончании отсчета происходит переход в первоначальное состояние *IDLE*. Переход в состояние *WAIT_TXE* из *IDLE* происходит при поступлении запроса от внутренних модулей. В этом состоянии осуществляется проверка сигнала разрешения записи в *FIFO*. Как только разрешение получено, авто-

мат переходит в состояние *WRITE_DATA*, после этого активируется запись в *FIFO* данных от внутренних модулей и осуществляется отсчет интервала *WRWAIT* для гарантированной их записи.

По окончании этого отсчета осуществляется переход в состояние *WAIT_WR2WR*. При этом переходе активируется сигнал подтверждения на окончании цикла запроса передачи данных от внутренних модулей. В состоянии *WAIT_WR2WR* осуществляется отсчет времени, необходимого для завершения текущей транзакции записи *FIFO* и началом новой. По окончании отсчета происходит переход в состояние *IDLE*, а в модуле управляющего автомата также формируется сигнал сброса для остальных модулей.

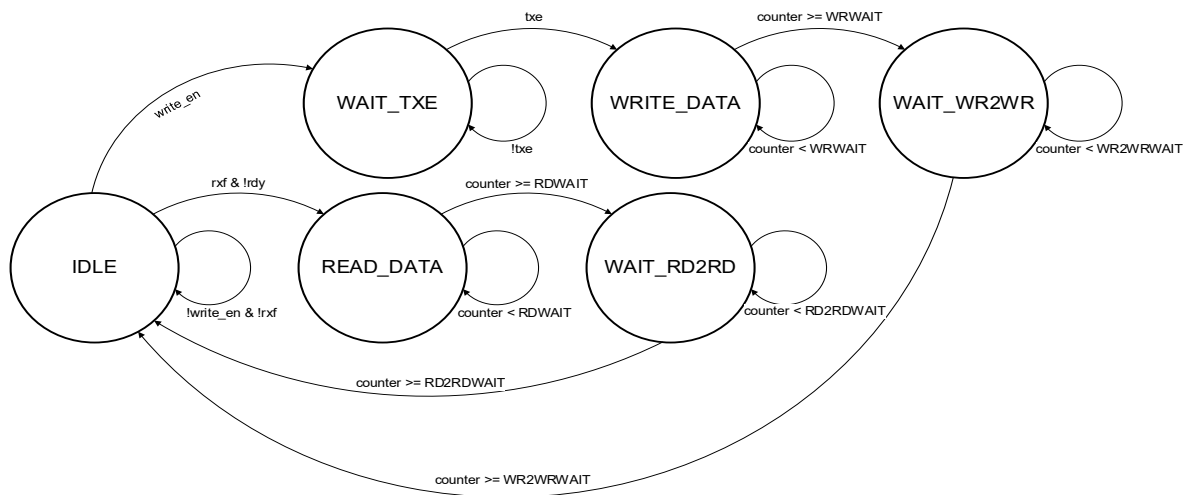


Рисунок 7 – Графическое представление управляющего автомата

Описание порта модуля верхнего уровня. Соответствующие выводы ПЛИС, описанные в файле настроек *ISE Design Suite*, привязываются к порту основного модуля (*gen_mod.vhd*). Порт модуля верхнего уровня включает в себя:

- clk_50MHz*. Вход тактового генератора 50 МГц;
- ft245_rxf_n*. Вход сигнала разрешения чтения *FIFO*;
- ft245_txe_n*. Вход сигнала разрешения записи *FIFO*;
- ft245_pwren_n*. Вход сигнала сброса по питанию;
- ft245_rd_n*. Выход сигнала чтения *FIFO*;
- ft245_wr*. Выход сигнала записи *FIFO*;
- ft245_d_io*. Двухнаправленная 8-разрядная шина данных *FIFO*;
- c1fl_tx*. Выход последовательных данных на передатчик стыка *CI-ФЛ-БИ*;
- c1fl_rx*. Вход последовательных данных с приемника стыка *CI-ФЛ-БИ*.

Симуляция работы проекта с использованием ModelSim. Для проверки работоспособности алгоритма устройства был разработан испытательный стенд (файл – *testbench.vhd*), который представляет собой еще один объект проекта, но без портов. В

конфигурации тестового стенда происходит объявление ранее разработанного устройства, на его входы подаются тестирующие сигналы, производится анализ его работы. Блок-схемы процедур записи и чтения *FIFO* представлены на рисунке 8. Блок-схема алгоритма работы испытательного стенда представлена на рисунке 9.

Фрагменты *Vhdl*-описания файла *testbench.vhd* приведены ниже.

```
constant CYCLE: time := 20 ns;
signal c1fl_tx: std_logic := '0';
signal c1fl_rx: std_logic := '0';
signal ft245_d_io: std_logic_vector(7
downto 0) = "ZZZZZZZZ";
signal clk_50Mhz: std_logic := '0';
signal ft245_rxf_n: std_logic := '1';
signal ft245_txe_n: std_logic := '0';
signal ft245_rd_n: std_logic := '0';
signal ft245_wr: std_logic := '0';
signal ft245_pwren_n: std_logic := '1';
.....
begin
  clk_gen : process
  begin
    clk_50Mhz <= '0';
    wait for CYCLE/2;
    clk_50Mhz <= '1';
```

```

        wait for CYCLE/2;
    end process;
    gen_mod_inst : gen_mod
    port map (
        ft245_pwren_n => ft245_
pwren_n,
        ft245_txe_n => ft245_txe_n,
        ft245_rxf_n => ft245_rxf_n,
        clk_50Mhz => clk_50Mhz,
        ft245_d_io => ft245_d_io,
        cfl_rx => cfl_rx,
        ft245_wr => ft245_wr,
        ft245_rd_n => ft245_rd_n,
        cfl_tx => cfl_tx
    );
    cfl_rx <= cfl_tx;
    Stimuli : process
    -- ^^^^^^^^^Процедура записи^^^^^^^^^^
    procedure wr (byte_in: IN STD_LOGIC_
VECTOR(7 downto 0)) is
    begin
        ft245_rxf_n <= '0';
        wait until falling_edge(ft245_
rd_n);
        ft245_d_io <= byte_in;
        wait until rising_edge(ft245_rd_n);
        ft245_rxf_n <= '1';
        ft245_d_io <= (others => 'Z');
        wait for 50 ns + 80 ns;
    end;
    -- ^^^^^^^^^Процедура чтения^^^^^^^^^^
    procedure rd ( byte_in: IN STD_LOGIC_
VECTOR(7 downto 0)) is
    begin

```

```

        wait until rising_edge(ft245_wr);
        assert (ft245_d_io = byte_in) re-
port "data do not match!" severity warning;
    end;
    begin
    -- 1: выставляем сигнал power enable
    ft245_pwren_n <= '1';
    wait for 300 ns;
    ft245_pwren_n <= '0';
    wait for 300 ns;
    -- 2: записываем данные
    wr(b"01011001");
    -- 3: включаем прием и передачу,
    выставляем скорость 19200 бит\с
    wr(b"10011101");
    -- 4: читаем данные
    rd(b"01011001");
    wait for 100 us;
    -- 5: завершение симуляции
    report "End simulation." severity
note;
    wait;
    end process Stimuli;
end behavioral;

```

На рисунке 10 представлены временные диаграммы, отражающие результаты моделирования, которое продолжалось в течение 400 микросекунд.

На схеме, представленной на рисунке 11, изображен процесс записи данных в FIFO. В ходе первой транзакции осуществляется передача данных в регистр передачи, тогда как вторая транзакция запускает функционирование устройства.

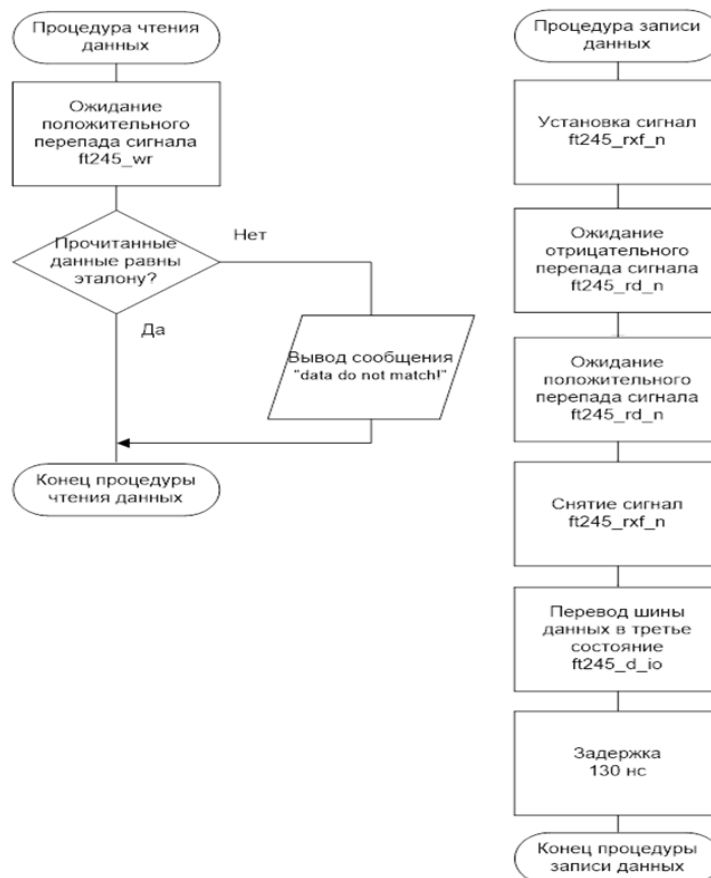


Рисунок 8 – Блок-схема процедур записи и чтения FIFO

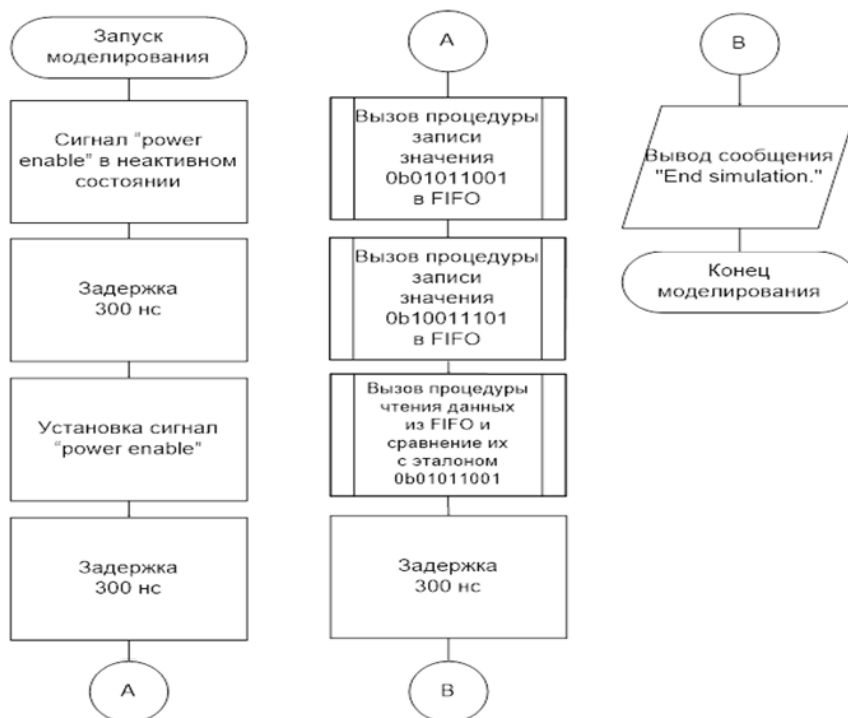


Рисунок 9 – Блок-схема алгоритма работы испытательного стенда

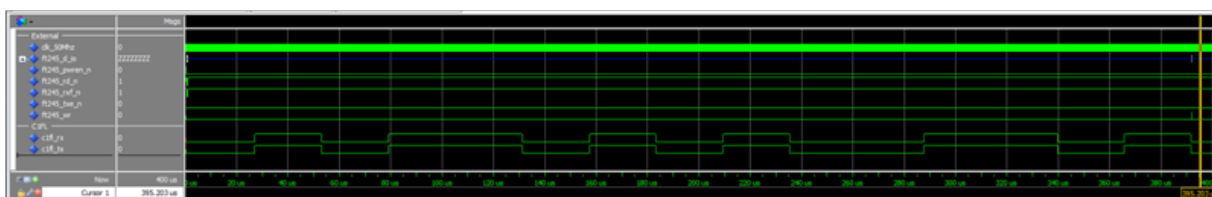


Рисунок 10 – Результат моделирования

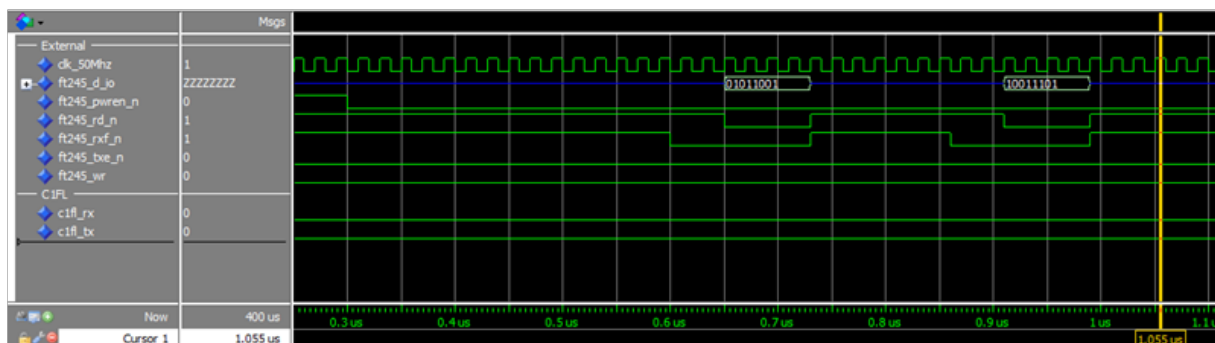


Рисунок 11 – Сигналограмма процесса записи данных в FIFO

На представленных диаграммах приведены разделенные на три категории сигналы. Первая категория сигналов (*External*) включает в себя тактовые импульсы частотой 50 МГц (*clk_50Mhz*) от внешнего источника, а также сигналы с микросхемы *FT245R*. Для сброса служит сигнал *ft245_pwren_n*. Посредством сигналов *ft245_wr* и *ft245_rd_n*, а также *ft245_txe_n* и *ft245_rxf_n* осуществляются операции записи и чтения соответственно. Данные, которые предназначены для передачи, формируются в двоичном виде на двунаправленной шине *ft245_d_io*. Вторая категория сигналов (*C1FL*) – последовательные данные для передатчика и приемника (сигналы *c1fl_tx*

и *c1fl_rx* соответственно).

Обсуждение. Предложен вариант структуры цифрового модуля, предназначенного для подключения специализированного оборудования к персональным компьютерам через разъем *С1-ФЛ-БИ* с использованием *USB*-интерфейса. Для реализации модуля-конвертера выбран вариант использования ПЛИС *XC6SLX4* от компании *Xilinx*, обладающей достаточно высокой производительностью. Временные диаграммы работы устройства демонстрируют близость к результатам эмуляции на ПЭВМ, что подтверждает возможность использования предложенного варианта цифрового модуля для стыка

системной USB-шины с блоком биимпульсного кодирования на практике.

Выводы. Создан цифровой преобразователь для интеграции специализированных устройств с персональными компьютерами с применением разъема *C1-ФЛ-БИ* и USB-интерфейса. Разработанное устройство построено на ПЛИС *Spartan 6* от ведущего производителя – компании *Xilinx*. Для кодирования данных на разъеме *C1-ФЛ-БИ* используется ПЛИС *Xilinx XC6SLX4* с емкостью 10000 логических ячеек. Связь конвертера с персональным компьютером осуществляется высокоскоростным аппаратным мостом, реализующим USB-интерфейс версии 2.0 с помощью микросхемы *FT245*. Управление и отладка производятся с использованием персонального компьютера, подключенного к устройству по стандарту *USB 2.0*. Функциональные возможности устройства включают в себя поддержку скорости передачи данных через разъем *C1-ФЛ-БИ* до 64000 бит/с, биимпульсное кодирование данных на разъеме *C1-ФЛ-БИ* и совместимость со стандартом *USB 2.0*. Разработанный цифровой конвертер может найти применение в авиации и других специализированных приборах и устройствах различного назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Березин Н.М., Чернецкая И.Е. Построение арифметического устройства на ПЛИС // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов и обработки изображений. Материалы XVI Международной научно-технической конференции. Редколлегия: С.Г. Емельянов, В.С. Титов (отв. ред.) [и др.]. Курск, 2021. – С. 58-60.
2. Гук М. Аппаратные интерфейсы ПК. Энциклопедия. – СПб.: Питер, 2002. – 997 с.
3. Малютин Д.С., Смаровоз М.В. Разработка лабораторного стенда для исследования возможностей системы подвижной радиосвязи "Омск" // Физико-математические и технические науки как постиндустриальный фундамент эволюции информационного общества: Сборник статей Международной научно-практической конференции, 2018. – С. 47-52.
4. Xilinx Spartan-6 - FPGA/ПЛИС – Xilinx [Электронный ресурс]. – URL: <https://inline-ctc.ru/xilinx/spartan-6> (дата обращения: 20.09.2023).
5. Коробков А.Р., Забелов Д.С., Шерстюк А.Е., Димитров Д.А. Реализация модуля управления передачи данных через USB-FIFO интерфейс на базе микросхемы FT245R // Межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов им. Е.В. Арменского, 2019. – С. 175-176.
6. Тишков В.В., Иванов В.Г., Лукьянчик В.Н. Обоснование облика построения перспективных комплексов и средств связи на основе опыта организации связи при проведении специальной военной операции // Военная мысль. – 2023. – № 9. – С. 59-72.
7. Хульцебош Ю. USB в электронике. 2-е изд. – СПб: БХВ-Петербург, 2011. – 224 с.
8. Харрис Дэвид М., Харрис Сара Л. Цифровая схемотехника и архитектура компьютера. – Москва: ДМК Пресс, 2018. – 792 с.
9. Мартышкин А.И. Конвертер для подключения специальной аппаратуры к ПЭВМ через СТЫК С1-И с использованием интерфейса USB // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2017: сборник трудов II Международной научно-технической и научно-методической конференции: в 8 т. Рязанский государственный радиотехнический университет, 2017. – С. 260-263.
10. Акаев А.М., Еркинова М.Е., Асылжанова А.Б. Проектирование изделий на FPGA // Высокие технологии,

наука и образование: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей V Всероссийской научно-практической конференции, 2020. – С. 71-75.

11. Мальшев Н.М., Рыбкин С.В. Особенность разработки САПР для проектирования и верификации конфигурации ПЛИС // Наноиндустрия. – 2020. – № S96-1. – С. 270-276.
12. Тарасов И. Е. Разработка цифровых устройств на основе ПЛИС XILINX с применением языка VHDL. М.: Горячая линия-Телеком, 2021. – 252 с.
13. Бибило П.Н., Ланкевич Ю.Ю., Романов В.И. Логическая минимизация при синтезе комбинационных структур в FPGA // Информатика. – 2021. – Т. 18. № 1. – С. 7-24.
14. Пищиков Д.О. Разработка лабораторного стенда по исследованию КАНАЛОВ КВ-радиосвязи, образованных радиостанциями средней мощности // Инновационная наука. 2019. – № 4. – С. 73-76.
15. Ибрагим А.Х., Удовиченко С.Ю. Моделирование устройства кодирования информации для импульсной аппаратной нейросети // Математическое и информационное моделирование. Материалы Всероссийской конференции молодых ученых. Тюмень, 2020. – С. 10-16.
16. Соловьев В.В. Проектирование функциональных блоков встраиваемых систем на FPGA. М.: Горячая линия-Телеком, 2021. – 252 с.
17. Строгонов, А.В. Цифровая обработка сигналов в базе программируемых логических интегральных схем: учебное пособие для вузов. – 4-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 312 с.
18. Ушенина, И.В. Проектирование цифровых устройств на ПЛИС. – 2-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2023. – 408 с.
19. Наваби, З. Проектирование встраиваемых систем на ПЛИС; перевод с английского В. В. Соловьева. – Москва: ДМК Пресс, 2016. – 464 с.
20. Молодцов В.О., Смирнов В.Ю., Солнушкин С.Д., Чихман В.Н. Аппаратно-программное обеспечение поведенческого эксперимента // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2021. – Т. 24. № 1. – С. 42-47.

Статья поступила в редакцию 23.10.2023

Статья принята к публикации 15.12.2023

УДК 631.15

EDN: NRYYYVO

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ АПК РОССИИ

Авторы 2023

SPIN: 7345-7540

AuthorID: 585433

ORCID: 0000-0002-2377-539X

ScopusID: 57188806820

ПАЩЕНКО Татьяна Юрьевна, кандидат экономических наук, доцент,

доцент кафедры «Менеджмент и экономическая безопасность»

Пензенский государственный университет

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

ТИМОХИНА Дарья Михайловна, студентка кафедры «Менеджмент и экономическая безопасность»

Пензенский государственный университет

(440026, Россия, Пенза, улица Красная, 40, e-mail: daria.timokhina03@mail.ru)

Аннотация. Важным условием эффективного развития агропромышленного комплекса (далее АПК) является инновационное развитие. Статья посвящена проблемам и перспективам инновационного развития агропромышленного комплекса нашей страны. В тексте отражено современное состояние инновационных тенденций в аграрной сфере, представлены экспертные оценки и расчеты инновационной обеспеченности АПК России, а также результаты анализа инновационной активности в агропромышленном комплексе России. Данный анализ имеет большое практическое значение, так как позволяет выявить риски, оценить дополнительные возможности развития. Сделаны выводы о затруднениях распространения инноваций в АПК по ряду причин. Рассматриваются актуальные вопросы финансирования инновационного развития сельского хозяйства, упоминаются инновационные технологии, применяемые в АПК. Выявлены ограничения роста инновационной активности: административный барьер, отсутствие диалога между бизнесом и наукой и др. Отмечается важность повышения производительности для решения проблем, связанных с нехваткой рабочей силы труда в сельском хозяйстве. Подчеркивается важность государственной поддержки инновационного развития АПК, так как без постоянной финансовой поддержки государства такое развитие происходит недостаточно быстро, а это в современных условиях может создать серьезную угрозу продовольственной безопасности страны.

Ключевые слова: инновации, инновационное развитие, инновационные технологии, АПК, сельское хозяйство.

PROBLEMS AND PROSPECTS OF INNOVATIVE DEVELOPMENT OF RUSSIA'S AIC

The Authors 2023

PASHCHENKO Tatiana Yuryevna, candidate of sciences in Economics, associate professor,

associate professor of the department «Management and economic security»

Penza State University

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

TIMOKHINA Daria Mikhailovna, student of the department «Management and economic security»

Penza State University

(440026, Russia, Penza, Krasnaya Street, 40, e-mail: daria.timokhina03@mail.ru)

Abstract. Innovative development is an important condition for the effective development of the agro-industrial complex (hereinafter AIC). The article is devoted to the problems and prospects of innovative development of the agro-industrial complex of our country. The text reflects the current state of innovative trends in the agricultural sector and presents expert assessments and calculations of the innovative security of the Russia's AIC, as well as the results of an analysis of innovative activity in the Russian agro-industrial complex. This analysis is of great practical importance, allowing us to identify risks and evaluate additional development opportunities. Conclusions are drawn about the difficulties of disseminating innovations in the AIC for several reasons. Current issues of financing innovative development of agriculture are considered, and innovative technologies used in the AIC are mentioned. Limitations to the growth of innovative activity have been identified: administrative barrier, lack of dialogue between business and science, etc. The importance of increasing productivity to solve problems associated with labor shortages in agriculture is noted. The importance of state support for the innovative development of the agro-industrial complex is emphasized, since without constant financial support from the state such development does not occur quickly enough, and this in modern conditions can create a serious threat to the country's food security.

Keywords: innovations, innovative development, innovative technologies, AIC, agriculture.

Для цитирования: Пащенко Т.Ю. Проблемы и перспективы инновационного развития АПК России / Т.Ю. Пащенко, Д.М. Тимохина // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 12. – № 4(64). – С.127-131. – EDN: NRYYYVO.

Введение. Инновационное развитие является ключевым фактором повышения эффективности и конкурентоспособности аграрного сектора экономики. Под «инновациями» в сельском хозяйстве понимают не только новые сорта растений или новые породы животных, но и новаторские методы организации производства, новую технику и технологии, периодическое повышение квалификации кадров и применение новых методов борьбы с истощением ресурсов. Россия является устойчивым экспортером продукции АПК – в настоящее время в рейтинге основных мировых экспортеров продовольствия она занимает 17 место. Причем за период 2010-2022 гг. поставки продукции за рубеж выросли практически в 5 раз [14]. Россия импортирует зерновые культуры, масложировую продукцию, рыбу, мясную и молочную продукцию, а также продукцию пищевой перерабатывающей промышленности. Но удельный вес наукоемкой продукции в российском АПК установился в 0,3% от общего объема, тогда как в высокоразвитых странах он составляет 20% [8].

Примерно 10-12 лет назад в АПК России начался процесс активной модернизации. Несмотря на значительную дороговизну внедрения инноваций, уже сейчас заметен существенный результат, выраженный в росте производственных показателей и улучшении финансовых результатов. Однако совокупный инновационный потенциал АПК раскрыт недостаточно. По оценкам экономистов Россия получает 4-5% от возможных выгод, тогда как в США этот показатель – около 50% [8].

Методология. Изучению проблем и перспектив инновационного развития АПК России посвятили свои работы многие ученые: Александрова Е.В., Воробьева Е.А. [1], Аржанцев С.А. [2], Архипова М.Ю., Афонина В.Е. [3], Бессонова Е.А., Руденко И.Р. [4], Володин В.М., Бареева И.А. [6], Дзудцова Е. М. [7], Кот Е.М., Шарпова В.М., Пильникова И.Ф., Пильников Л.Н., Ошуркова В.А. [9], Куликов Н.И., Куликов А.Н., Куликова М.А., Пархоменко В.Л. [10], Оборин М.С. [10], Разуваев Р.А., Цацулин А.Н. [11], Сальникова О.В., Рожкова Л.В. [15], Санду И.С., Кулов А.Р., Нечаев В.И., Рыженкова Н.Е. [16, 17], Фазылова С.С., Яркова Т.М. [19], Фудина Е.В. [20], Шик О.В., Янбых Р.Г. [21] и др. В [12] сделан прогноз развития АПК, в [18] оценены состояние и перспективы трансфера технологий в АПК, а в [8] учеными НИУ ВШЭ были предложены рекомендации по увеличению инновационного потенциала развития сельского хозяйства. В то же время отдельные вопросы инновационного развития АПК пока еще недостаточно изучены. Цель настоящей работы – анализ проблем и перспектив инновационного развития АПК России.

Для достижения поставленной цели и решения сформулированных в соответствии с ней задач использовались следующие методы: метод информационного поиска в сети Интернет; метод поиска

информации по профессиональным базам данных и аналитическим обзорам; метод контент-анализа; метод ранжирования; метод классификации и др.

С помощью перечисленных выше методов было выявлено, что помимо внешних факторов, препятствующих эффективной деятельности и планомерному развитию агропромышленного комплекса, существуют также внутренние. В первую очередь – это устаревание сельскохозяйственной техники и относительно невысокий уровень развития перерабатывающей отрасли АПК. Можно говорить об использовании предприятиями морально устаревшей техники с высокой степенью износа. К тому же значительной проблемой для АПК России является тенденция сокращения объемов производства, слабая развитость сельской инфраструктуры, являющейся одной из основных составляющих функционирования сельского хозяйства. Трудности с привлечением молодых кадров и внутренняя миграция жителей из-за относительно низкого уровня жизни приводят к недостатку рабочей силы в сельском хозяйстве, и, как следствие, к его ослаблению. Снижение количества дипломированных специалистов на предприятиях АПК и тенденция к сокращению финансирования сельскохозяйственной науки, также приводят к усугублению проблемы обеспечения квалифицированными кадрами.

Следует упомянуть о сезонности поступления денежных средств и нехватке собственных активов для реализации деятельности у многих агропредприятий. Стоит также отметить, что ресурсный потенциал АПК России снижается. Наблюдается тенденция к уменьшению земель, пригодных для сельскохозяйственного использования вследствие различных природных факторов (затопление, опустыивание, загрязнение и засоление посевных площадей, сокращение запасов пресной воды). Существует риск снижения объемов и качества урожая по причине увеличения частоты метеорологических экстремов, а также из-за распространения сельскохозяйственных вредителей и болезней.

В силу сложившихся экономических, политических и социальных условий российская экономическая система как никогда нуждается в активной трансформации агропромышленного комплекса. Четвертая промышленная революция привела к выходу современных продовольственных систем на принципиально новый уровень технологического развития, характеризующийся внедрением и использованием умных, биологических и альтернативных технологий и источников сырья.

Результаты. Согласно результатам проведенного анализа существует множество особенностей развития российского сельского хозяйства, а именно:

– экстенсивный рост аграрного производства (В сельском хозяйстве России занято порядка 7 % населения, при том, что, например, в США этот показатель – около 2% [8]. Повышение произ-

водительности труда остается значимым рычагом в решении проблем, связанных с нехваткой рабочей силы);

- отсутствие четкого плана инновационной модернизации АПК;
- наличие диспропорций и точечный характер в инновационном развитии;
- низкая востребованность отечественных разработок на международном рынке;
- зависимость отечественных аграриев от зарубежной техники и технологий;
- недостаток прикладных НИОКР, а также недостаточное бюджетное финансирование и инвестирование научных исследований и открытий (хотя в рамках национального проекта «Наука и

университеты» предусмотрено развитие инноваций в сельском хозяйстве).

На рисунке 1 показаны ограничения роста инновационной активности (по убыванию их значимости, в процентах от общего числа ответов экспертов) [8].

Агропромышленный комплекс напрямую связан с обеспечением продовольственной безопасности страны, поэтому важно, чтобы уровень инновационной активности предприятий повышался. Без государственной поддержки в современных условиях было бы сложно добиться разработки и внедрения инноваций в сельское хозяйство. На рисунке 2 представлена динамика затрат на осуществление проекта «Цифровое сельское хозяйство».

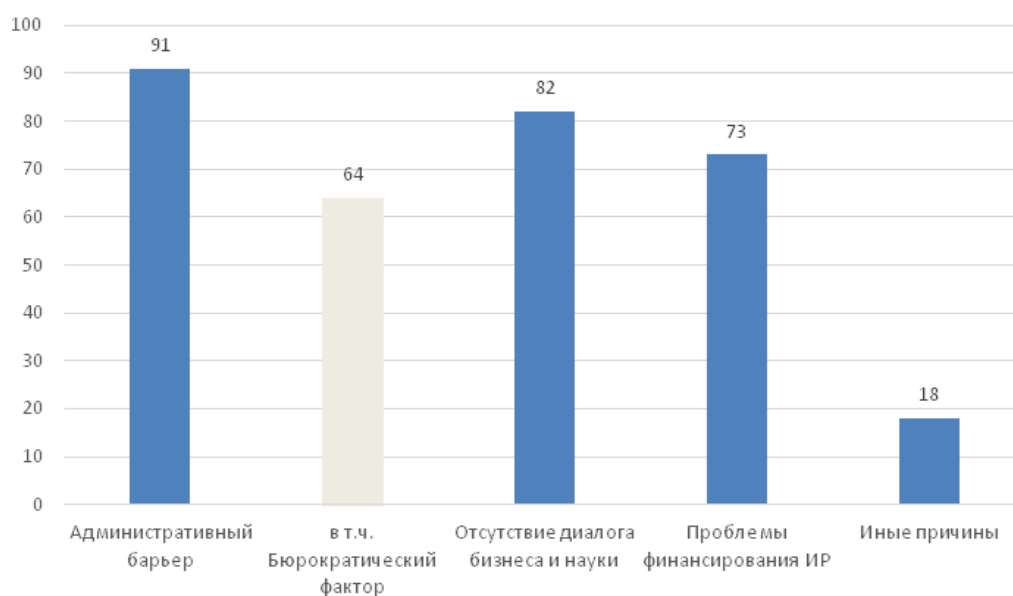


Рисунок 1 – Рейтинги влияния ограничений роста инновационной активности, % [8]

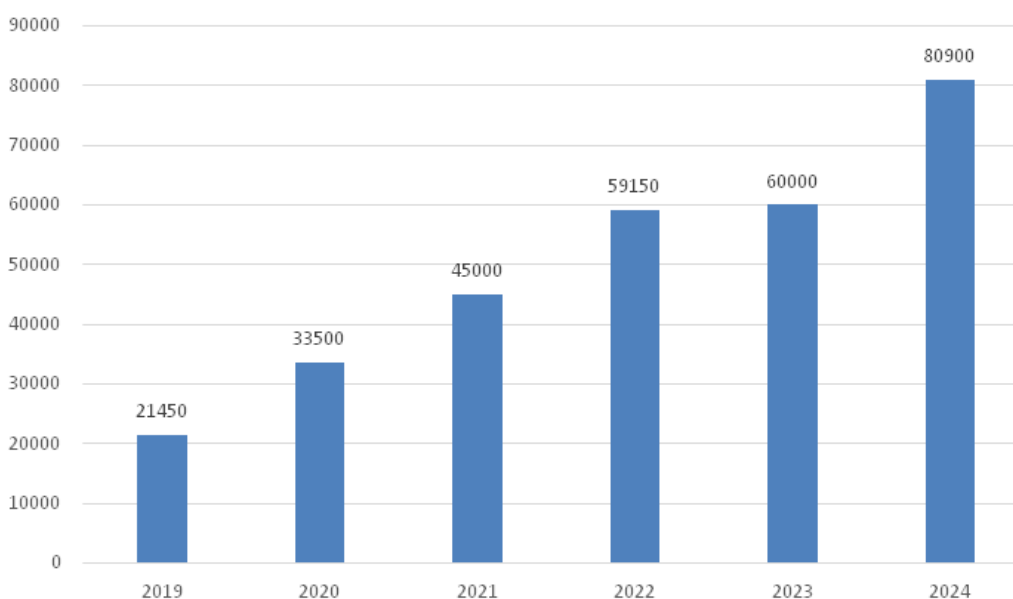


Рисунок 2 – Динамика затрат на осуществление проекта «Цифровое сельское хозяйство», млн. руб. [5]

Обсуждение. В мировой агропромышленной практике уже существуют инновационные разработки, аналоги которых могут быть разработаны и применяться и в России. Например, программное обеспечение «AgCode». Программа позволяет отслеживать изменения метеорологических условий. Существует также система «Sample6». Данная программа используется для поиска патогенных веществ в растениях. Система может распознать болезнетворные организмы в течении шести часов после его попадания в растение. Процесс полностью автоматизирован – поиск патогенов происходит без участия работника. Достаточно популярна система

интеллектуального полива «CropX». Каждая из зон земельного участка снабжается беспроводным датчиком, который анализирует тип и состояние почвы, а, следовательно, регулирует подачу воды. Это ведет к наиболее качественному урожаю и максимальной минимизации его потерь.

На рисунке 3 показано воздействие на российский АПК технологий и трендов, в процентах (по числу ответов экспертов).

На рисунке 4 представлены цифровые инструменты, применяемые в агропромышленном комплексе РФ, в процентах (по частоте использования).

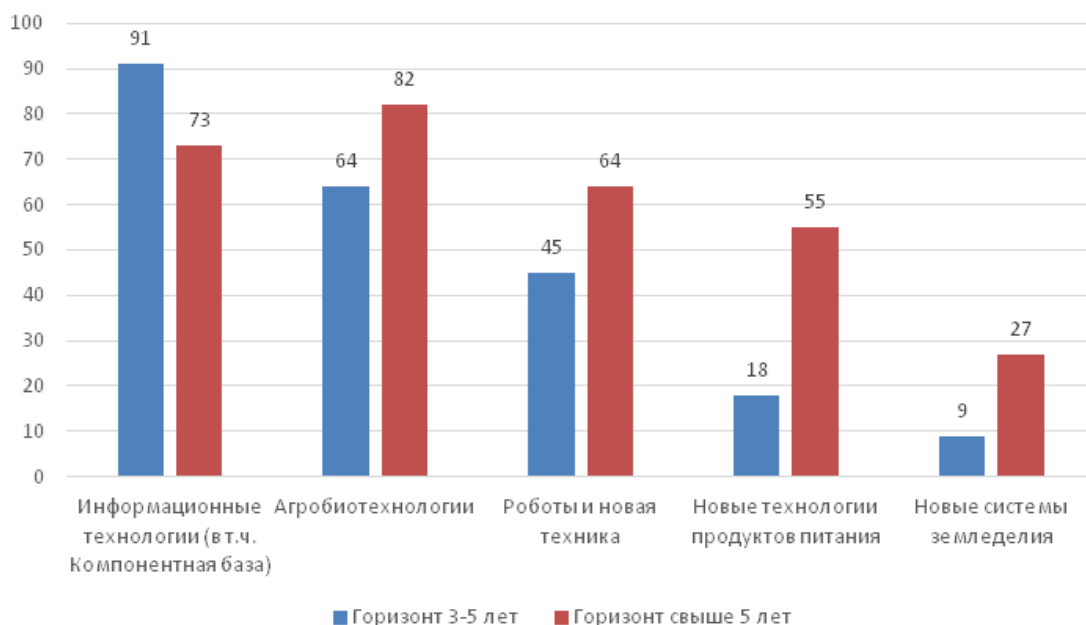


Рисунок 3 – Воздействие на АПК технологий и трендов, % [8]

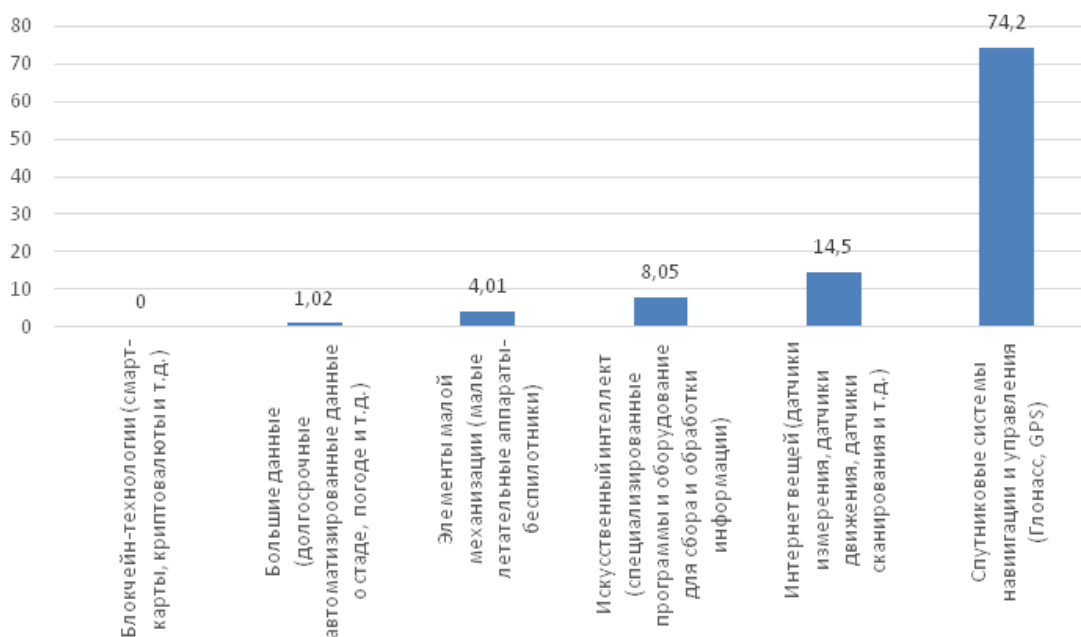


Рисунок 4 – Цифровые инструменты, применяемые в агропромышленном комплексе РФ, % [11]

В России на данный момент существует не так много организаций, где производство опирается на продвинутое научно-техническое составляющую. Как пример, можно привести ООО «БДМ-Агро». Компания позиционирует себя как организацию, опережающую спрос и предвосхищающую требования потребителя. Кроме того, ООО «БДМ-Агро» обладает масштабными производственными мощностями, а также широкой дилерской и сервисной сетью, что позволяет объединить научно-технические разработки, производство, сбыт и обслуживание выпускаемой продукции.

Выводы. Применение инновационных технологий открывает возможности для роста объемов ВВП и НД, а также для увеличения производительности труда и наиболее эффективного распределения имеющихся ресурсов. В силу вышеизложенного, основополагающим фактором реализации аграрной политики России должно являться научное и инновационное развитие. Такое развитие важно для обеспечения конкурентоспособности и последующего развития всего АПК. В ином случае российская экономика может не перенести всех последствий существующей в настоящее время экономической блокады, связанной с введенными западными странами социально-политическими и экономическими санкциями в адрес Российской Федерации и применяемой для дестабилизации продовольственной безопасности нашей страны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Александрова Е.В., Воробьева Е.А. Инновационные технологии в агропромышленном комплексе // Вестник сельского развития и социальной политики. – 2021. №1 (29). С. 27-30.
2. Аржанцев С.А. Теоретические аспекты инновационного развития агропромышленного комплекса // Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве. – 2019. – № 2 (10). – С. 11-18.
3. Архипова М.Ю., Афонина В.Е. Инновационные направления развития сельскохозяйственных производств // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2020. – № 4. – С. 35-44.
4. Бессонова Е.А., Руденко И.Р. Инновационное развитие агропромышленного комплекса в обеспечении экономической безопасности России // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Экономика. Социология. Менеджмент. – 2020. – Т. 10. – № 4. – С. 25-36.
5. Ведомственный проект «Цифровое сельское хозяйство»: официальное издание. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2019. – 48 с.
6. Володин В.М., Бареева И.А. Особенности развития сельского хозяйства в условиях глобализации // Экономика и предпринимательство. – 2023. – № 6 (155). – С. 691-699.
7. Дзудцова Е.М. Инновации в агропромышленном комплексе // Экономика и управление: проблемы, решения. – 2022. – Т. 4. – С. 10-15.
8. Инновационное развитие агропромышленного комплекса в России. Agriculture 4.0 [Текст]: докл. к XXI Агр. междунар. науч. конф. по проблемам развития экономики и общества, Москва, 2020 г. / Н.В. Орлова, Е.В. Серова, Д.В. Николаев и др.; под ред. Н.В. Орловой; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». – М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2020. – 128 с.
9. Кот Е.М., Шарпова В.М., Пильникова И.Ф., Пильников Л.Н., Ошуркова В.А. Применение технологий цифровой экономики в агропромышленном комплексе // Образование и право. – 2023. – № 8. – С. 185-188.
10. Куликов Н.И., Куликов А.Н., Куликова М.А., Пархоменко В.Л. Устойчивый рост и инновационное развитие АПК России в условиях санкционного давления со стороны стран Запада // АПК: экономика, управление. – 2023. – № 6. – С. 24-34.
11. Оборин М.С. Цифровые инновационные технологии в сельском хозяйстве // Аграрный вестник Урала. – 2022. – № 5 (220). – С. 82-92.
12. Прогноз научно-технологического развития агропромышленного комплекса Российской Федерации на период до 2030 года // Минсельхоз России; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». – М.: НИУ ВШЭ, 2017. – 140 с.
13. Разуваев Р.А., Цацулин А.Н. Каковы ближайшие перспективы реализации инновационной активности отечественного АПК // Управленческое консультирование. – 2022. – № 3. – С. 95-107.
14. Российский экспорт АПК // Официальный сайт Федерального центра развития экспорта продукции АПК Минсельхоза России [Электронный ресурс]. – <https://aemcx.ru/export/rusexport/>
15. Сальникова О.В., Рожкова Л.В. Применение инновационных технологий в сельском хозяйстве стран БРИКС // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Общественные науки. – 2021. – № 1. – С. 115-125.
16. Санду И.С., Кулов А.Р., Рыженкова Н.Е. Стратегические направления совершенствования институтов инвестиционно-инновационного развития АПК // Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве. – 2023. – № 6 (100). – С. 178-186.
17. Санду И.С., Нечаев В.И., Рыженкова Н.Е. К вопросу о разработке новой стратегии инновационного развития АПК: предпосылки и приоритеты // Экономика сельского хозяйства России. – 2022. – № 8. – С. 2-12.
18. Трансфер технологий в АПК: состояние и перспективы развития: аналит. обзор. – ФГБНУ «Росинформагротех», 2020. – 92 с.
19. Фазылова С.С., Яркова Т.М. Цифровизация в сельском хозяйстве региона как инструмент развития // Креативная экономика. – 2020. – Т. 14. – № 8. – С. 1737-1748.
20. Фудина Е.В. Актуальные проблемы и перспективы развития агропромышленного комплекса России // International agricultural journal. – 2020. – №1. – С. 127-133.
21. Шик О.В., Янбых Р.Г. Оценка уровня государственной поддержки АПК и предложения по повышению ее эффективности // АПК: экономика и управление. – 2023. – № 4. – С. 3-16.

Статья поступила в редакцию 25.10.2023

Статья принята к публикации 15.12.2023

УДК 664.681.9

EDN: APSODG

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЦЕПТУРНЫХ ИНГРЕДИЕНТОВ МЕТОДОМ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА В РЕЦЕПТУРЕ МАРМЕЛАДА ИЗ ТЫКВЫ

© Автор(ы) 2023

SPIN: 9059-3028

AuthorID: 1144557

ORCID: 0000-0002-0228-0523

АБУШАЕВА Асия Рафаильевна, ассистент кафедры «Технологии продуктов питания»

*Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии им. Н.И. Вавилова
(410005, Россия, Саратов, улица Соколова, 335, e-mail: asiyatugush@mail.ru)*

SPIN: 5579-0304

AuthorID: 427241

ORCID: 0000-0002-9918-852X

ScopusID: 57210968526

САДЫГОВА Мадина Карипулловна, доктор технических наук,
профессор кафедры «Технологии продуктов питания»

*Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии им. Н.И. Вавилова
(410005, Россия, Саратов, улица Соколова, 335, e-mail: sadigova.madina@yandex.ru)*

SPIN: 9219-0421

AuthorID: 1070660

ORCID: 0000-0003-4200-0896

ScopusID: 57212193187

СЕМИЛЕТ Никита Александрович, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Технологии продуктов питания»

*Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии им. Н.И. Вавилова
(410005, Россия, Саратов, улица Соколова, 335, e-mail: semiletna@yandex.ru)*

ORCID: 0009-0003-8112-3626

АБДРЯШИТОВА Марьям Рауфовна, магистрант

*Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии им. Н.И. Вавилова
(410005, Россия, Саратов, улица Соколова, 335, e-mail: seydgazova@inbox.ru)*

Аннотация. Мармелад является одним из самых востребованных кондитерских изделий, при этом недостатком мармеладно-пастильных кондитерских изделий является малое содержание в них витаминов, макро- и микроэлементов, пищевых волокон, сопровождающийся избытком легко усваиваемых углеводов. Актуальным в решении данной проблемы является использование в рецептуре мармелада тыквы продовольственной, агара пищевого и меда натурального. В работе представлена технология изготовления мармелада из тыквы, обладающий выраженными диетическими, антиоксидантными свойствами за счет присутствия β -каротина и других каротиноидов, аскорбиновой кислоты, высокого содержания *K* и *Mg*, способствующих нормализации сердечно-сосудистой деятельности и водно-солевого обмена, а пищевые волокна мякоти тыквы обладают пребиотическим, детоксицирующим и послабляющим действием. Массовую долю влаги определяли по ГОСТ 5900-2014. Структурно-механические показатели качества определяли на анализаторе текстуры «Структурометр СТ-3» посредством однократного воздействия на испытуемый образец путем сжатия. В ходе теста измеряли усилие, которое необходимо приложить для деформации и до заданного момента окончания теста. Полученные результаты позволяют оценить твердость, эластичность, прочность, вязкость, текучесть, консистенцию, адгезию и др. Оптимизацию рецептуры кондитерских изделий проводили с использованием регрессионного анализа на основе нелинейных многомерных статистических моделей, при этом обработку экспериментальных данных проводили по статистическим критериям Кохрена, Стьюдента, Фишера при доверительной вероятности 0,95. В результате разработана технология изготовления мармелада из тыквы, характеризующаяся улучшенной прозрачной консистенцией, а также улучшенным вкусом, так как мед натуральный маскирует привкус тыквы. Наблюдается увеличение массовой доли влаги в кондитерских изделиях на 2,0-2,2%, но данное значение не превышает нормативных. Из структурно-механических характеристик следует, что полная замена желатина и сахара белого на агар пищевой и мед натуральный, не влияет на прочностные характеристики готовых образцов желеино-мармелада, что доказывает сбалансированность рецептурных компонентов. Разработаны нелинейные многомерные статистические модели, из которых следует, что в рецептуре мармелада из тыквы оптимальным считается полная замена желатина на агар пищевой и сахара белого на мед натуральный. На новый вид кондитерских изделий оформлена нормативно-техническая документация СТО, ТИ, РЦ 00493497-005-2022 Мармелад желеино-мармеладный «Халяль» из тыквы «Мэхэббэт».

Ключевые слова: тыква продовольственная, агар пищевой, мед натуральный, мармелад, органолептические показатели, физико-химические показатели, структурно-механические показатели, оптимизация, регрес-

сия, математическая модель.

OPTIMIZATION OF PRESCRIPTION INGREDIENTS BY REGRESSION ANALYSIS IN THE FORMULATION OF PUMPKIN MARMALADE

© The Author(s) 2023

ABUSHAeva Asiya Rafailyevna, assistant of the Department of "Food Technology"
Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov
(410005, Russia, Saratov, Sokolova Street, 335, e-mail: asiyatugush@mail.ru)

SADYGOVA Madina Karipullova, doctor of technical sciences,
professor of the department of "Food Technology"
Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov
(335 Sokolovaya Street, Saratov, 410005, Russia, e-mail: sadigova.madina@yandex.ru)

SEMILET Nikita Aleksandrovich, candidate of technical sciences,
associate professor of the department of "Food Technology"
Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov
(410005, Russia, Saratov, Sokolova Street, 335, e-mail: semiletna@yandex.ru)

ABDRYASHITOVA Maryam Raufovna, master's student
Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov
(335 Sokolovaya Street, Saratov, 410005, Russia, e-mail: seydgazova@inbox.ru)

Abstract. Marmalade is one of the most popular confectionery products, while the disadvantage of marmalade-pastille confectionery is the low content of vitamins, macro- and microelements, dietary fiber, accompanied by an excess of easily digestible carbohydrates. Topical in solving this problem is the use of pumpkin food marmalade, food agar and natural honey in the recipe. The paper presents the technology of making pumpkin marmalade, which has pronounced dietary, antioxidant properties due to the presence of beta-carotene and other carotenoids, ascorbic acid, high K and Mg content, contributing to the normalization of cardiovascular activity and water-salt metabolism, and the dietary fibers of pumpkin pulp have a prebiotic, detoxifying and laxative effect. The mass fraction of moisture was determined according to GOST 5900-2014. Structural and mechanical quality indicators were determined on the texture analyzer "Structurometer ST-3" by means of a single impact on the test sample by compression. During the test, the force that must be applied for deformation and up to a given moment of the end of the test was measured. The results obtained allow us to evaluate hardness, elasticity, strength, viscosity, fluidity, consistency, adhesion, etc. The optimization of the confectionery formulation was carried out using regression analysis based on nonlinear multidimensional statistical models, while the processing of experimental data was carried out according to the statistical criteria of Kohren, Student, Fisher with a confidence probability of 0.95. As a result, a technology for making pumpkin marmalade has been developed, characterized by an improved transparent consistency, as well as an improved taste, since natural honey masks the taste of pumpkin. There is an increase in the mass fraction of moisture in confectionery products by 2.0-2.2%, but this value does not exceed the standard. It follows from the structural and mechanical characteristics that the complete replacement of gelatin and white sugar with food agar and natural honey does not affect the strength characteristics of the finished jelly marmalade samples, which proves the balance of the prescription components. Nonlinear multidimensional statistical models have been developed, from which it follows that in the formulation of pumpkin marmalade, the complete replacement of gelatin with food agar and white sugar with natural honey is considered optimal. For a new type of confectionery, regulatory and technical documentation has been issued for STO, TI, RC 00493497-005-2022 Jelly jelly "Halal" from pumpkin "Mahabbat".

Keywords: pumpkin, food agar, natural honey, marmalade, organoleptic indicators, physico-chemical indicators, structural and mechanical indicators, optimization, regression, mathematical model.

Для цитирования: Абушаева А.Р. Оптимизация рецептурных ингредиентов методом регрессионного анализа в рецептуре мармелада из тыквы / А.Р. Абушаева, М.К. Садыгова, Н.А. Семилет, М.Р. Абдрияшитова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 12. – № 4(64). – С. 132-141. – EDN: AGJPHG.

Введение. На сегодняшний день мармелад включает в себя большое количество различных позиций, стремящихся к стабильному и высокому качеству. Наблюдается тенденция расширения ассортимента новых продуктов с повышенным содержанием микронутриентов, при этом обладающих диетическими свойствами и отличающихся своей оригинальностью [1-4]. Мармелад подразделяют на следующие группы в зависимости от студнеобразующей основы и технологий приготовления:

1) фруктово-ягодный – 30%; 2) жележный – 20%; 3) жележно-фруктовый – 20% [5].

Спрос на традиционные виды мармелада стабилен, данный вид кондитерских изделий является конкурентоспособным (традиционный мармелад занимает 30% от общего объема рынка). Вместе с тем, наблюдается постоянное расширение ассортимента за счет появления новых видов, в том числе инновационных кондитерских изделий [6-10].

Примерно 40-50% рынка занимает жележно-

формовой мармелад, обладающий доступной ценой и полезными свойствами за счет желирующих компонентов, в качестве которых выступают агар пищевой и пектин. К полезным свойствам данного студнеобразователя относится отсутствие калорий, углеводов, сахара и жира, а также крахмала глютен, дрожжей и консервантов. Агар пищевой способен поглощать глюкозу в желудке и в течение короткого времени проходить через пищеварительную систему, что позволяет организму не удерживать и не накапливать излишки жира. Водопоглотительная способность агара пищевого способствуют удалению шлаков из организма, а способность поглощать желчь – помогает растворить больше холестерина. Агар пищевой примерно на 80% состоит из пищевых волокон, что рекомендовано в диетическом питании. Кроме того, благодаря тому, что данный студнеобразователь изготавливают из водорослей, он обогащает организм йодом, нормализует сахар в крови, нормализует кислотность в желудке, питает полезные бактерии кишечника, улучшает работу печени, выводит из организма соли тяжелых металлов и токсинов, связывает и выводит жиры, содержащиеся в других продуктах, и притупляют аппетит, что способствует снижению веса [11].

Как известно мармелад не содержит жиров, что придает изделию диетические свойства. Но данное кондитерское изделие является низкокалорийным продуктом, при условии приготовления его на натуральной основе (пюре, сок из фруктов или овощей) без использования пищевых добавок (красители, консерванты и т.п.). К полезным свойствам мармелада можно отнести ее способность нормализовать углеводный и жировой обмен веществ, а также содержание холестерина в крови, ускорять заживление мелких ран, трещин, ссадин на поверхности кожного покрова, нормализовать работу печени, служит профилактикой желудочно-кишечных заболеваний, стабилизировать работу нервной системы, повысить работоспособность человека при высоких физических и эмоциональных нагрузках. Кроме того, данное изделие характеризующийся сравнительно низкой себестоимостью, по сравнению с другими кондитерскими изделиями [12].

Благодаря полезным свойствам, это кондитерское изделие набирает все большую популярность у потребителя. В 2021 году предприятиями РФ было выпущено 69 172 т мармелада, что на 7.8% выше, чем в 2020 году, при этом среднегодовой прирост производства мармелада за период 2017-2021 гг. составил 3.7%. Среди федеральных округов Российской Федерации по производству мармелада занимает лидирующее место Центральный Федеральный округ, составляющий 46.6% производства за период 2017-2021 гг., на втором месте Приволжский Федеральный округ – 18.1% производства. В апреле 2023 года средние производственные цены на мармелад приравнялись 182 823,6 руб./т [13]. В связи с вышеуказанными

данными, можно сделать вывод о том, что разработка новых видов мармелада считается актуальной темой исследования.

К существенным недостаткам желеино-мармелада можно отнести недостаточное содержание в них витаминов, макро- и микроэлементов, пищевых волокон, при этом характерной чертой мармеладно-пастильных изделий является избыток легко усваиваемых углеводов [14, 15].

На сегодняшний день в среднем человек употребляет 100-150 г сахара в сутки, данный показатель превышает рациональную норму потребления сахара. Институтом питания рекомендована замена сахара белого в рецептурах пищевых продуктов на альтернативные виды сырья, обладающие диетическими или лечебно-профилактическими свойствами. Поэтому использование меда натурального в качестве подсластителя является актуальной темой исследования и отвечает задачам, представленным в «Стратегии повышения качества пищевой продукции в Российской Федерации до 2030 года» [16].

Для расширения ассортимента кондитерских изделий лечебно-профилактического, функционального назначения или изделий, обладающих диетическими свойствами необходимо использовать натуральное растительное сырье в виде овощного или фруктового пюре [17-19]. Предпочтение отдается легкодоступным и дешевым сырьевым ресурсам. Актуальным в этом направлении является применение пюре из тыквы.

Тыква продовольственная, мед натуральный и агар пищевой содержат в своем составе, необходимые для организма человека, минеральные вещества, витамины и пищевые волокна. Поэтому целью исследования является подбор и оптимизация рецептурных ингредиентов мармелада из тыквы методом регрессионного анализа.

Методология. Исследования по разработке рецептуры мармелада из тыквы с использованием в качестве студнеобразователя агара пищевого, а в качестве подсластителя – меда натурального были проведены в учебной лаборатории по хлебопекарному, кондитерскому и макаронному производству кафедры технологии продуктов питания ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова».

В учебной научно-исследовательской лаборатории по определению качества пищевой и сельскохозяйственной продукции ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова» определили структурно-механические показатели качества на приборе СТ-3. Установление структурно-механических показателей качества мармелада осуществляется тензодатчиком, с помощью инденторов, выбор которых зависит от класса контролируемых параметров и текстурных признаков про-

дукта. Для проведения анализа образец мармелада устанавливали на предметном столике, после чего подводили его под индентор до касания и подвергали различным видам деформации.

В испытательной лаборатории ФБУ «Саратовский ЦСМ имени Б.А. Дубовикова» были определены физико-химические показатели качества образцов мармелада из тыквы: массовую долю влаги по ГОСТ 5900-2014.

Оптимизация рецептуры кондитерских изделий с применением меда натурального и агара пищевого была проведена с использованием регрессионного анализа на основе нелинейных многомерных статистических моделей [20, 21]. Обработку экспериментальных данных проводили по статистическим критериям Кохрена, Стьюдента, Фишера с учетом доверительной вероятности равной 0,95 [22, 23].

Задача оптимизации по каждому из критериев

была решена с помощью процедуры «Поиск решения» в программе *MS Excel*.

Объекты исследования – модели мармелада, изготовленных на основе тыквенного пюре:

1. Контрольный образец – изготовлен по стандартной рецептуре, в которой в качестве студнеобразователя использовали желатин, а в качестве подсластителя – сахар белый;

2. Образец 1 – в качестве студнеобразователя использовали агар-агар, а в качестве подсластителя – сахар белый;

3. Образец 2 – в качестве студнеобразователя использовали желатин, а в качестве подсластителя – мед натуральный;

4. Образец 3 – в качестве студнеобразователя использовали агар-агар, в качестве подсластителя – мед натуральный.

Технология изготовления мармелада представлена на рисунке 1.

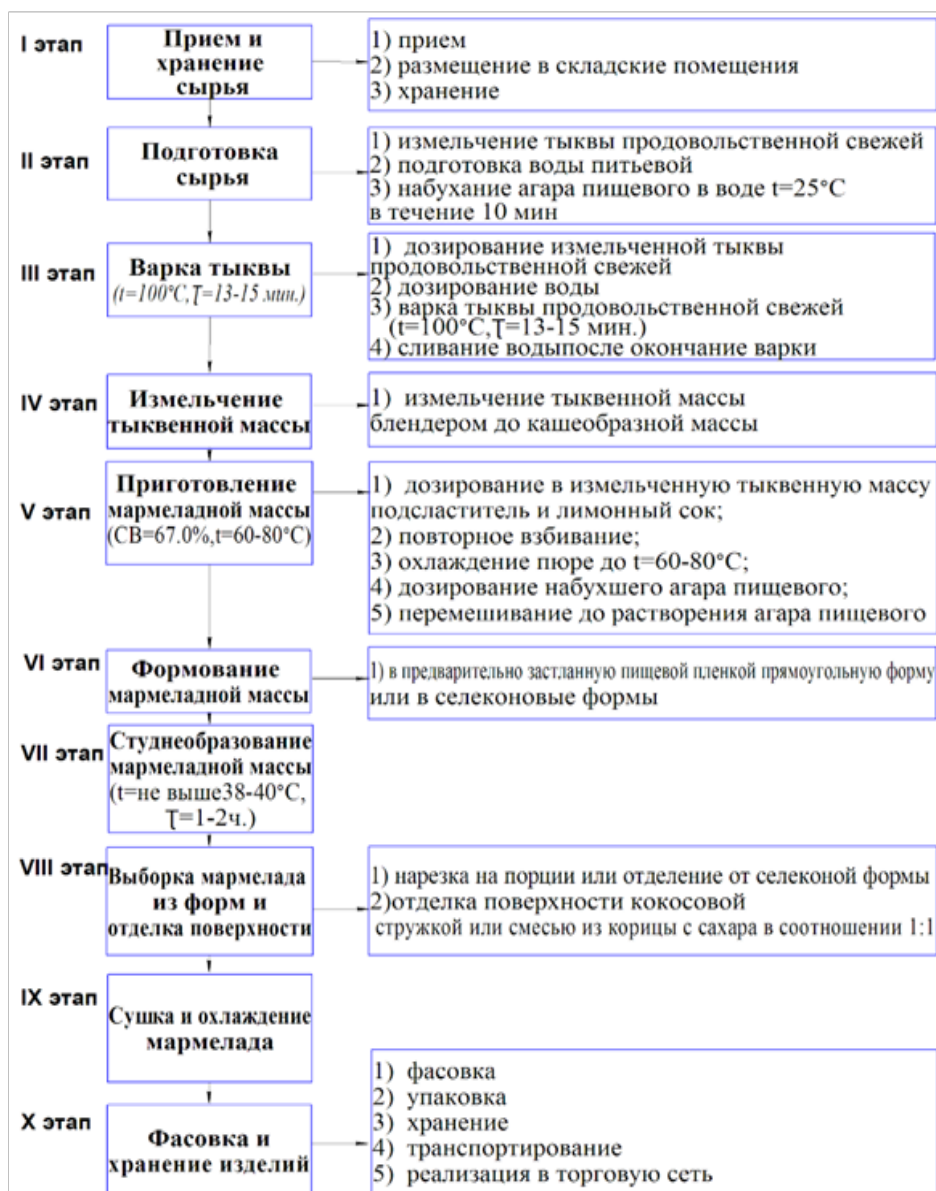


Рисунок 1 – Технология изготовления мармелада из тыквы

В качестве основного сырья в технологии желей-ного мармелада использовали тыкву «Ананасная» – это мускатный сорт тыквы, ценность которой заключается в хороших вкусовых характеристиках, нежной и сочной мякоти. Характерная особенность данного сорта в том, что на месте утолщения тыквы имеется небольшая семенная камера, гораздо меньше, чем в большинстве сортов тыквы, то есть в тыкве «Ананасная» значительно больше мякоти. Название тыквы связано с оригинальным вкусом, характеризующимся присутствием привкуса ореховых ноток и ананаса, при этом тыквенный запах отсутствует. Данная культура обладает хорошими показателями при хранении, причем после трех месяцев хранения тыква приобретает ярко-выраженный сладкий вкус.

Тыквенное пюре получают посредством варки предварительно очищенной и измельченной тыквы в воде до готовности (кипятить 3-5 минут). В процессе варки тыквы необходимо снимать образовавшуюся пенку. По окончании варки овоща, воду сливают и измельчают тыкву блендером до кашеобразной массы.

В готовое тыквенное пюре дозируют подсластитель и лимонный сок, после чего снова взбивают массу блендером.

Технология изготовления опытных образцов мармелада отличаются от контроля тем, что в качестве студнеобразователя используется агар-агар, в качестве подсластителя сахар белый или мед натуральный, после окончания варки тыквы воду из общей массы полуфабриката не сливают, застыва-

ние массы осуществляется условиях в учебной лаборатории в течение 1-2 часов, в качестве обсыпки для мармелада используют корицу или кокосовую стружку.

Оптимальным количеством агар-агара является 5-5,5% по отношению к общей массе рецептурных компонентов, что придает изделию необходимую консистенцию и способствует улучшению органолептических показателей качества мармелада, так как структура изделия приобретает плотность и прозрачность. Еще одним положительным показателем использования агара пищевого является упрощение технологического процесса изготовления мармелада, так как данный студнеобразователь позволяет осуществлять выстаивание продукта в условиях цеха.

Результаты. Готовые образцы мармелада предоставлены на рисунке 2.

Введение в желейный мармелад агара пищевого в качестве студнеобразователя и меда натурального в качестве подсластителя изменяет и структуру готового изделия, поэтому в ходе работы определили данный показатель на приборе структурометр СТ-3. Зависимость относительной деформации от изгибающего усилия в образцах желейного мармелада показана на таблице 1.

Структурно-механические свойства желейного мармелада из тыквы представлены на рисунке 3.

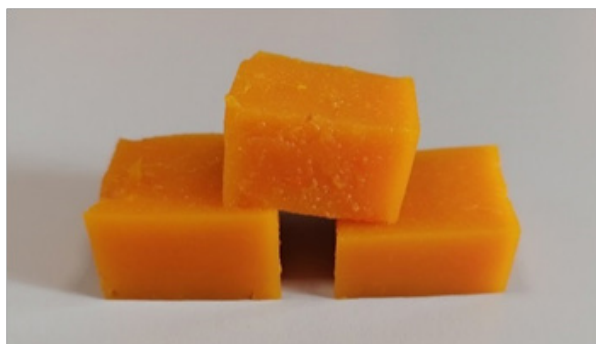
Дозировка меда натурального в рецептуру мармелада из тыквы находилась в пределах от 0 до 100 % к массе сахара белого, тогда как замену желатина осуществили сразу на 100 % (табл. 2).



1



2



3

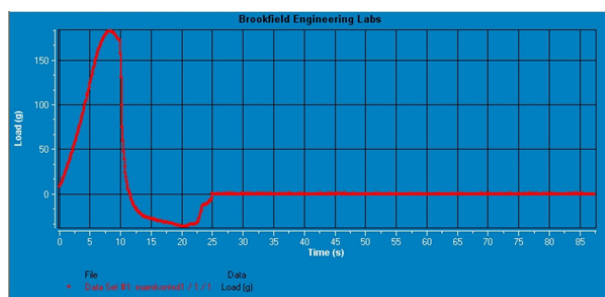


4

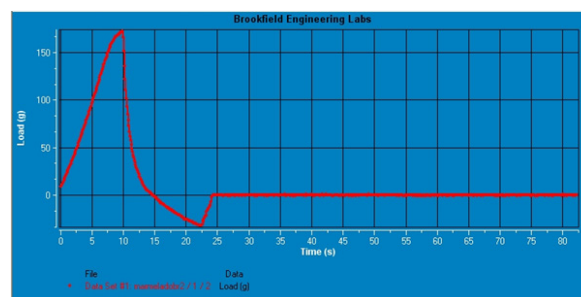
Рисунок 2 – Внешний вид образцов желейного мармелада из тыквы:
 1 – контрольный образец, 2 – образец 1, 3 – образец 2, 4 – образец 3

Таблица 1 – Зависимость относительной деформации от изгибающего усилия для контрольного образца (1) и опытных с использованием агара пищевого и меда натурального

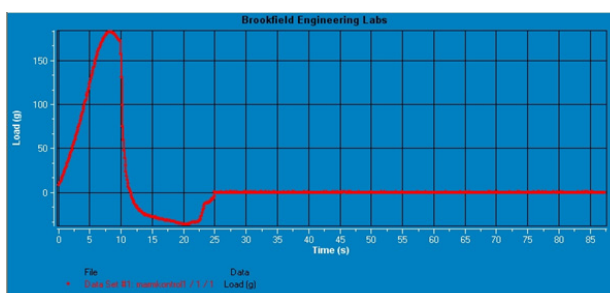
Наименование показателей	Образцы желеиногo мармелада			
	Контроль	Образец 1	Образец 2	Образец 3
Цикл твердения, г	182,5	182,6	172,5	172,7
Деформация при твердости, мм	4,22	4,23	4,0	4,21
Процент деформации при твердости, %	10,60	10,61	14,2	14,41
Рабочий цикл по твердости, г*см	56,10	56,11	47,5	47,7
Цикл восстанавливаемой деформации, мм	0,68	0,69	2,0	2,21
Восстанавливаемый рабочий цикл, г*см	3,30	3,31	9,0	9,21
Общий рабочий цикл, г*см	59,40	59,41	57,3	57,51
Нагрузка на цель, г	172,00	172,10	172,5	172,71
Деформация в мишени, мм	4,98	4,99	4,0	4,21
Процент деформации на мишени, %	12,5	12,6	14,2	14,41
Пиковое напряжение, Па	10227,0	10227,1	7049,0	7049,0
Деформация при пиковой нагрузке	0,11	0,12	0,0	0,12
Сила сцепления, г	36,5	36,6	32,0	32,2
Адгезивная способность, г*см	17,8	17,9	9,0	9,2
Упругость	0,06	0,07	21,0	21,02
Длина волокнистости, мм	4,59	4,60	3,89	3,91
Проделанная работа по приданию жесткости, г*см	12,8	12,9	7,20	7,41
Количество изломов	0,0	0,0	0,0	0,0
Разрушаемость, г	182,5	182,6	172,5	172,7
1-е снижение нагрузки на трещину, г	1,0	1,1	181,0	181,2
Выполнена 1-я работа по разрушению, г*см	42,6	42,7	47,5	47,7
Деформация 1-го перелома, мм	4,22	4,23	4,97	4,99
Деформация 1-го перелома, %	10,6	10,7	14,2	14,4
Длина выборки, мм	40,0	40,1	35,0	35,2



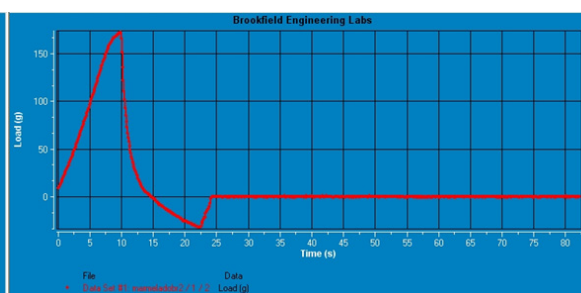
1)



2)



3)



4)

Рисунок 3 – Изменение усилия нагружения на инденторе в зависимости от глубины его внедрения в корпус желеиногo мармелада из тыквы: 1 – контрольный образец; 2 – образец 1; 3 – образец 2; 4 – образец 3

Таблица 2 – Показатели качества мармелада из тыквы

Наименование показателей	Значение показателей при дозировании студнеобразователя, %	Значение показателей при дозировании меда натурального, %											
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
Массовая доля влаги, %	100,0	17,04	17,23	17,47	17,71	17,94	18,18	18,42	18,66	18,70	18,94	19,2	
Рабочий цикл по твердости, г*см		56,11	55,18	54,24	53,31	52,37	51,44	50,50	49,57	48,64	48,3	47,7	
Адгезивная способность, г*см		17,9	16,93	15,96	14,99	14,02	13,05	12,08	11,11	10,14	9,17	9,2	

В ходе исследования произведена количественная оценка влияния дозировки меда натурального на физико-химические показатели и структурно-механические характеристики мармелада из тыквы, которую позволяют оценить разработанные нелинейные многомерные статистические модели (рис. 4-6). Входные параметры модели – рецептурное количество меда натурального и агара пищевого, а управляемые параметры модели – массовая доля влаги, рабочий цикл по твердости и адгезивная способность.

При замене нелинейных объясняющих переменных получаем многофакторное уравнение линейной регрессии.

Результаты измерения показателей массовой доли влаги мармелада из тыквы представлена на рисунке 4.

Результаты измерения показателей рабочего цикла по твердости мармелада из тыквы представлена на рисунке 5.

Результаты измерения показателей адгезионной способности (способность к прилипанию) мармелада из тыквы представлена на рисунке 6.

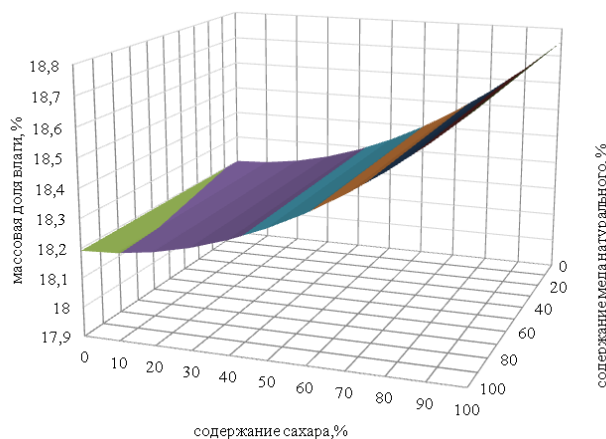


Рисунок 4 – Влияние меда натурального и агара пищевого на массовую долю влаги мармелада из тыквы

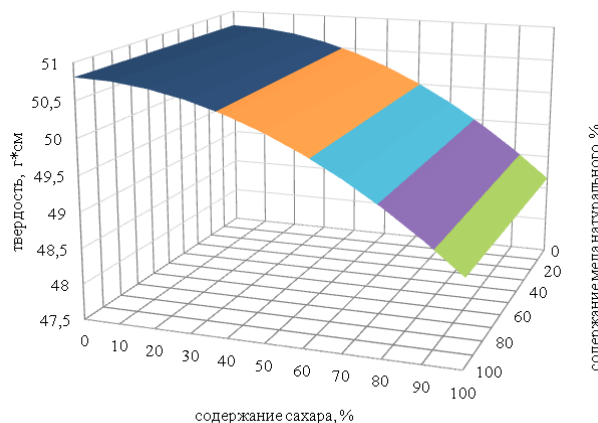


Рисунок 5 – Влияние меда натурального и агара пищевого на твердость мармелада из тыквы

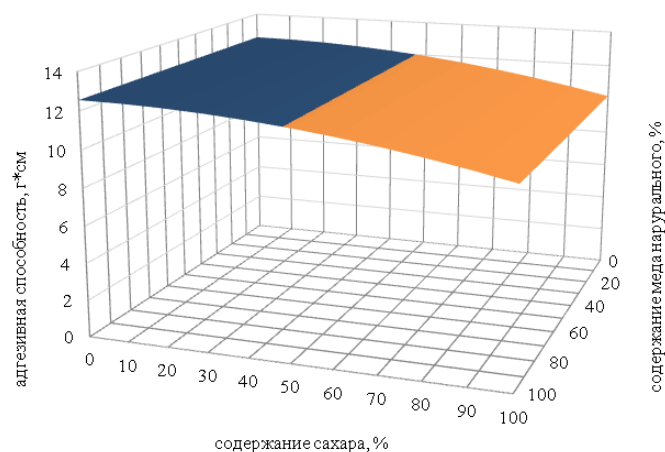


Рисунок 6 – Влияние меда натурального и агара пищевого на адгезивную способность мармелада из тыквы

Обсуждение. По внешнему виду опытные образцы не различаются (рис. 2), цвет мармелада оранжевый, свойственный используемому виду сырья. Форма – соответствует данному наименованию мармелада, правильная, с четкими гранями, деформация отсутствует. Во всех образцах желейного мармелада студнеобразная и затяжистая консистенция, у изделий с использованием в качестве студнеобразователя агар-агара (образец 1 и 3) – прозрачная, в отличие от образцов контрольный и 2. Выделяется образец 3, так как характеризуется улучшенной прозрачной структурой, а также улучшенным вкусом, так как мед натуральный маскирует привкус тыквы.

Твердость изделий (табл. 1) при дозировке меда натурального (образцы 2 и 3) меньше, чем в образцах контрольном и 1 на 5,48 и 5,42% соответственно, при этом нагрузка на объект сохраняется примерно в одном значении. Деформация на объект почти не изменяется и находится в пределах 4,0-4,99 мм, так как изделие обладает пластичной структурой количество изломов равняется нулю.

У мармелада с внесением меда натурального (образцы 2 и 3) адгезионное напряжение снизилось для образца 2 на 49,44 и 49,72%, для образца 3 на 48,31 и 48,60%, по сравнению с контрольным образцом и образцом 1 соответственно, что возможно позволит снизить количество возвратных отходов при выработке желейного мармелада, благодаря образованию межмолекулярных водородных связей полисахаридами меда натурального. Радиус взаимодействия молекул полисахаридов друг с другом достаточно широкий, благодаря чему увеличивается прочность связи «вода – полисахарид» притом, что содержание свободной влаги снижается.

Как видно из рисунка 3 структурно-механические свойства желейного мармелада из тыквы в образцах контрольном и №3, а также №1 и №2 не различаются. Усилие деформации в образцах 1 и 2 меньше на 2,78%, чем в образцах контрольном и 3. Из рисунка 3 можно сделать вывод о том, что полная замена желатина и сахара белого на агар пищевой и мед натуральный, не влияет на прочностные

характеристики готовых образцов желейного мармелада, что доказывает сбалансированность рецептурных компонентов. Желейный мармелад из тыквы с сахаром белым и агаром пищевым (образец 1) обладает высоким показателем вязкости и наиболее выраженной упруго-пластичной консистенцией. Раствор агара пищевого характеризуется более высокой вязкостью, по сравнению с раствором желатина, в связи с чем различаются и технологические свойства желейных масс, в частности процесс студнеобразования (для агара данный процесс занимает в среднем 1 час, для желатина – 2-3 часа). Чем выше вязкость желейной кондитерской массы, тем выше температура начала студнеобразования, благодаря чему выстраивание желейного мармелада из тыквы с использованием агара пищевого в качестве студнеобразователя (образцы 1 и 3) можно осуществлять при комнатной температуре, а готовое изделие способно не терять форму и не плавится даже при температуре +40°C. Данные свойства значительно облегчают технологический процесс изготовления желейного мармелада из тыквы.

Как известно, на прочность желейного мармелада оказывает влияние не только качество студнеобразователя, рецептура, влажность массы и содержание в ней редуцирующих веществ, но и содержание сахара белого. Повышенное содержание сахара снижает прочность желейной массы, поэтому в образце 3 желейного мармелада с заменой сахара белого на мед, наблюдается повышение прочности изделия, по сравнению с остальными образцами.

Повышенное *pH* мармеладной массы не только ухудшает вкусовые свойства готовых изделий, но и в процессе уваривания приводит к образованию чрезмерного содержания фруктозы, в последствие вызывающую явление синерезиса в готовых изделиях в процессе хранения. Тогда как при недостаточном содержании кислоты, мармеладная масса плохо застывает. Тыквенное пюре не обладает желеирующей способностью, что связано с низкой молекулярной массой пектиновых молекул и низкой степенью этерификации карбоксильных групп в составе тык-

вы. Положительной чертой данного пюре является низкая кислотность, поскольку в работе в качестве студнеобразователя используется агар пищевой, который отличается небольшой устойчивостью при 4,0 рН. Данный показатель позволяет не учитывать пюре при расчете вводимой кислоты, в конкретном случае лимонного сока, в рецептуру желейного мармелада.

В ходе исследования была проведена проверка качества и значимости нелинейных многомерных статистических моделей (рис. 4-6). Были определены расчетные значения *t*-критерия (*t*-статистики) для соответствующих коэффициентов регрессии для проверки на значимость отдельных коэффициентов регрессии. Посредством проверки гипотезы о равенстве нулю *j*-го параметра уравнения, с использованием *t*-статистики провели анализ статистической значимости параметров модели (коэффициентов регрессии). Полученные статистические показатели подтвердили значимость построенных уравнений в целом и отдельных параметров. Коэффициент множественной корреляции для всех моделей больше 0,69, что выше среднего значения зависимости управляемых параметров от входных параметров. Задача оптимизации по каждому критерию была решена с помощью действия «Поиск решения» в программе *MS Excel*.

Установлено, что изменение содержания меда натурального оказывает влияние на физико-химические показатели и структурно-механические характеристики опытных образцов мармелада. С увеличением дозировки меда натурального от 0 до 100%, массовая доля влаги и адгезивная способность мармелада, то есть способность к налипанию уменьшается, что является положительным показателем для мармелада, показатель твердости готового изделия снижается незначительно. В рецептуре мармелада из тыквы оптимальным считается полная замена желатина на агар пищевой и сахара белого на мед натуральный.

Выводы. Наблюдается положительное влияние агара пищевого и меда натурального на качество мармелада из тыквы. По органолептическим показателям, выделяется образец 3, так как характеризуется улучшенной прозрачной структурой, а также улучшенным вкусом, так как мед маскирует привкус тыквы.

По физико-химическим показателям с внесением меда натурального наблюдается увеличение массовой доли влаги в кондитерских изделиях на 2,0-2,2%, но данное значение не превышает нормативных значений. Из структурно-механических характеристик можно сделать вывод о том, что полная замена желатина и сахара белого на агар пищевой и мед натуральный, не влияет на прочностные характеристики готовых образцов желейного мармелада, что доказывает сбалансированность рецептурных компонентов.

Разработанные нелинейные многомерные статистические модели указывают на то, что в рецептуре мармелада из тыквы оптимальным считается полная замена желатина на агар пищевой и сахара белого на мед натуральный.

Новый вид кондитерских изделий рекомендованы для внедрения в кондитерское производство. На мармелад оформлена нормативно-техническая документация СТО, ТИ, РЦ 00493497-005-2022 Мармелад желейный «Халяль» из тыквы «Мэхэбэт»

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Санжаровская Н.С., Технология производства желейного мармелада на основе пектиновых экстрактов и фитонастоев. / Н.С. Санжаровская, О.П. Храпко // Международный научно-исследовательский журнал, 2017. – 10 (64) Часть 3 – С. 95-98. DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.64.055>
2. Тедикова С.Н., Никитин И.А., Кондратьев Н.Б., Семенкина Н.Г. Расширение ассортимента желейного формового мармелада на основе овощного пюре // Вестник ВГУИТ. 2018. Т. 80. № 2. С. 165-174. doi: 10.20914/2310-1202-2018-2-165-174
3. Wolf B. Confectionery and Sugar-Based Foods. 2016. doi: 10.1016/B978-0-08-100596-5.03452-1
4. Gould J.M., Furse S., Wolf B. The Role of Endogenous Lipids in the Emulsifying Properties of Cocoa // Front. Chem. 2016. V. 4. № 11. doi: 10.3389/fchem.2016.00011
5. ГОСТ 6442-2014 Мармелад. Общие технические условия: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2019-11-29 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – Изд. официальное. – Москва: Стандартинформ, 2019. – 6 с.
6. Типсина, Н.Н. Восточные сладости и национальные изделия: учеб. пособие / Н.Н. Типсина/ Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2018. – 150 с.
7. Чоманов У.Ч., Получение мармелада с использованием бахчевых культур. / У.Ч. Чоманов, М. Идаятова // Вестник алматинского технологического университета, 2023. – №2. – С. 140-146.
8. Красина Е.В., Исследование и разработка технологии и рецептуры мармелада с повышенными упруго-эластичными свойствами. / Е.В. Красина, А.Н. Куракина, Е.В. Филиппова / Инновации в науке и практике сборник статей по материалам XIV международной научно-практической конференции, 2019. – Т.1. Часть 2. – С. 131-136.
9. Багаутдинов И.И., Использование сока из ягод красной смородины в производстве мармелада. / И.И. Багаутдинов, А.З. Асманова, Л.М. Сабитова / Международная научно-практическая конференция в рамках XXXI международной специализированной выставки «Агрокомплекс-2021» "Современное состояние, традиции и инновационные технологии в развитии АПК", 2021. – Часть 3. – С. 3-7.
10. Shkolnikova M.N., About the use of pectin from wild berries pomace in the marmalade recipes. / Shkolnikova M.N. // Food industry, 2019. – Т.4. – №1. – С. 81-86.
11. Максимова О.А., Определение динамики гелеобразования агара-агара. / О.А. Максимова, В.В. Митин // Пищевая промышленность, 2013. – 7. – С.45-45.
12. Алиева М.М., Разработка технологии и изучение физико-химических показателей качества и безопасности желейно-фруктового мармелада на основе пюре из плодов кавказской рябины. / М.М.Алиева/ Магистерская диссертация. Баку, 2020. – 83 с.
13. Маркетинговое исследование. Рынок мармелада в России 2017-2023 гг. Цифры, тенденции, прогноз. [электронный ресурс] – режим доступа: <https://tk-solutions.ru/russia-rynok-marmelada> – дата обращения 08.01.2023 г.
14. Степанова, Е.Н. Технология производства и оценка качества обогащенного мармелада / Е.Н. Степанова, А.Н. Табаторович // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2010. – №5. – С. 48-51.
15. Сизова Т.И. Совершенствование технологии и товароведная оценка желейно-фруктового мармелада повышенной пищевой ценности. / Диссертация на соискание

ученой степени кандидата технических наук. Орел, 2017. – 230с.

16. Стратегия повышения качества пищевой продукции в Российской Федерации до 2030 года» (утверждены Распоряжением Правительства Российской Федерации от 29.06.2016 №1364-р) [электронный ресурс] – URL: <https://doc-viewer.yandex.ru/view/77732919> - дата обращения 21.08.2022 г.

17. Арсанукаев И.Х., Разработка технологии мармеладных изделий повышенной пищевой ценности увеличенного срока годности. / И.Х. Арсанукаев / Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Воронеж, 2010. – 24 с.

18. Табаторович, А.Н. Анализ применения обогащающих добавок в сахаристых кондитерских изделиях. / А.Н. Табаторович, Е.Н. Степанова, В.И. Бакайтис // Пищевая промышленность, 2020. – 9. – С. 18-22.

19. Попов В.Г., Богомазова Ю.И. Организация производства карамели с начинкой функционального назначения на основе дикорастущего растительного сырья для детского питания // Научное обозрение. 2016. № 14. С. 244-248.

20. Дудникова, Е.Б. Математическое моделирование состава мясных продуктов при комплексной переработке вторичных ресурсов. / Е.Б. Дудникова, Г.Н. Камышова, В.П. Корсунов, Е.В. Берднова // Вестник Саратовского государственного университета им. Н.И. Вавилова, 2016. – 9. – С. 49-53.

21. Кириллова Т.В. Статистическая зависимость (Статистическое моделирование в условиях стохастической неопределенности) / Т.В. Кириллова, И.Ю. Каневская / Издательство ООО «ЦеСАин», 2017. – 101 с.

22. Тугуш А.Р., Обоснование использования овощных добавок и оптимизация состава песочного теста методом регрессионного анализа. / А.Р. Тугуш, М.К. Садыгова, И.Ю. Каневская, Т.В. Кириллова, Д.Д. Контарева // Аграрный научный журнал. – 2018. – №1. – С. 81-87.

23. Тугуш, А.Р. Оптимизация в рецептуре песочного печенья обогащающих добавок. / А.Р. Тугуш, М.К. Садыгова, Д.Д. Контарева, Т.В. Кириллова / Ресурсосберегающие экологически безопасные технологии хранения и переработки сельскохозяйственной продукции: сб. ст. по материалам Международной научно-практической конференции, посвященной 75-летию Курганской области (19 марта 2018 г.) / под общ. ред. Сухановой С.Ф. – Курган: Изд-во Курганской ГСХА, 2018. – С.87-90.

Статья поступила в редакцию 14.09.2023

Статья принята к публикации 15.12.2023

УДК 664.9.022

EDN: VCBJOT

ПРИМЕНЕНИЕ БИОЗАЩИТНЫХ КУЛЬТУР В ТЕХНОЛОГИИ СНЕКОВ ИЗ МЯСА ПТИЦЫ

© Автор(ы) 2023

SPIN: 2694–7056

AuthorID: 266766

ORCID: 0000-0001-9275-7913

ResearcherID: Z-1996–2018

ScopusID: 15764513800

БАЗАРНОВА Юлия Генриховна, доктор технических наук, профессор,
директор Высшей школы биотехнологий и пищевых производств

Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого

(195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, e-mail: jbazarnova@spbstu.ru)

SPIN: 7932-4430

AuthorID: 962671

ORCID: 0000-0002-9132-3504

МОСКВИЧЕВ Александр Сергеевич, кандидат технических наук,
доцент Высшей школы биотехнологий и пищевых производств

Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого

(195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, e-mail: moskvichev_as@spbstu.ru)

SPIN: 4346-9111

AuthorID: 825853

ORCID: 0000-0003-4687-3483

МОСКВИЧЕВА Елена Владимировна, кандидат технических наук,
доцент Высшей школы биотехнологий и пищевых производств

Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого

(195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, e-mail: moskvicheva_ev@spbstu.ru)

ORCID: 0009-0009-0306-5348

НИКОЛАЕВ Илья Александрович, аспирант Высшей школы биотехнологий и пищевых производств
Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого

(195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, e-mail: nikolaev6.ia@edu.spbstu.ru)

Аннотация. В статье представлены результаты разработки барьерной технологии снеков (джерков) из куриного мяса с применением биозащитных культур. Изучена жизнеспособность микроорганизмов *Lactobacillus curvatus* в посолочных средах. Установлено отсутствие посторонней микрофлоры на поверхности образцов куриного филе в процессе посола с добавками препарата *Lactobacillus curvatus* в количестве 0,2 % от массы сырья. Разработана технологическая рецептура снеков из мяса птицы. Предложена смесь пряностей «Душистая», включающая черный молотый перец, кориандр, базилик и паприку. Предложена балльная шкала органолептической оценки качества разработанных куриных снеков. Экспериментально установлены оптимальные дозировки компонентов и условия их введения в состав продукта, позволяющие сохранить качество снеков при холодильном хранении. Разработаны режимы посола и сушки куриного филе при производстве снеков, обработанных культурой *Lactobacillus curvatus*. Выявлено, что уровень КМАФАнМ в контрольных образцах и образцах, обработанных биозащитной культурой, ниже примерно в 1,5 раза, что свидетельствует о проявлении барьерного эффекта *Lactobacillus curvatus*.

Ключевые слова: барьерные технологии, куриные снеки, биозащитные культуры, *Lactobacillus curvatus*, посольные смеси, температурные режимы сушки, балльная шкала органолептической оценки, микробиологические показатели снеков.

APPLICATION OF BIOPROTECTIVE CROPS IN THE TECHNOLOGY OF POULTRY MEAT SNACKS

© The Author(s) 2023

BAZARNOVA Julia Genrihovna, doctor of technical sciences, professor, director of the
Graduate School of Biotechnology and Food Science

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

(195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya, 29, e-mail: jbazarnova@spbstu.ru)

MOSKVICHEV Aleksandr Sergeevich, candidate of technical sciences, associate professor of the
Graduate School of Biotechnology and Food Science

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

(195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya, 29, e-mail: moskvichev_as@spbstu.ru)

MOSKVICHEVA Elena Vladimirovna, candidate of technical sciences, associate professor of the
Graduate School of Biotechnology and Food Science

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University
(195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya, 29, e-mail: moskvicheva_ev@spbstu.ru)

NIKOLAEV Ilya Aleksandrovich, graduate student of the
Graduate School of Biotechnology and Food Science
Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

(195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya, 29, e-mail: nikolaev6.ia@edu.spbstu.ru)

Abstract. The article presents the results of the development of barrier technology for snacks (jerks) made from chicken meat using bioprotective crops. The viability of *Lactobacillus curvatus* microorganisms in salting media has been studied. It was established that there was no foreign microflora on the surface of chicken fillet samples during salting with the addition of *Lactobacillus curvatus* in an amount of 0.2 % by weight of the raw material. A technological recipe for poultry meat snacks has been developed. A mixture of spices called “Fragrant” is offered, including ground black pepper, coriander, basil and paprika. A scoring scale for organoleptic assessment of the quality of the developed chicken snacks has been proposed. The optimal dosages of components and the conditions for their introduction into the product composition, which allow maintaining the quality of snacks during refrigerated storage, have been experimentally established. Regimes for salting and drying chicken fillet have been developed for the production of snacks treated with *Lactobacillus curvatus*. It was revealed that the level of QMAFAnM in control samples and samples treated with a bioprotective culture is approximately 1.5 times lower, which indicates the manifestation of the barrier effect of *Lactobacillus curvatus*.

Keywords: barrier technologies, chicken snacks, bioprotective crops, *Lactobacillus curvatus*, salting mixtures, drying temperature conditions, organoleptic rating scale, microbiological indicators of snacks.

Для цитирования: Базарнова Ю.Г. Применение биозащитных культур в технологии снеков из мяса птицы / Ю.Г. Базарнова, А.С. Москвичев, Е.В. Москвичева, И.А. Николаев // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 12. – № 4(64). – С. 142-149. – EDN: BCBJOT.

Введение. В последние годы на мировом рынке наблюдается тенденция роста потребительского спроса на продукты быстрого питания. В качестве закусок среди населения мегаполисов популярны мясные снеки – изделия из вяленого и сушёного мяса. Основными преимуществами мясных снеков являются небольшие порции и высокая пищевая ценность, что позволяет включать их в рационы спортивного питания и активного отдыха [1].

Особый интерес представляет снековая продукция из мяса птицы, отличающегося высоким содержанием полноценного легкоусвояемого белка и приятным вкусом. Кроме того, благодаря низким издержкам производства и короткому производственному циклу мясо птицы обладает высокой конкурентоспособностью и может рассматриваться как один из важнейших источников доступного и относительно дешёвого животного белка (цена 1 кг мяса крупного рогатого скота эквивалентна цене 3-4 кг мяса кур) [2- 4].

Традиционно мясные снеки представлены цельномышечными или формованными продуктами средней влажности, изготавливаемыми с использованием процессов посола и сушки. Высокое содержание белка и гигроскопичность мясных снеков могут оказаться благоприятной средой для развития плесеней, дрожжей, осмофильных патогенных бактерий родов *Bacillus*, *Clostridium*, *Listeria*, *Staphylococcus* и *Salmonella*. В настоящее время объективным показателем, который позволяет регулировать микробиологическую безопасность и сроки хранения пищевых продуктов является активность воды (a_w) [5]. Для снеков из мяса птицы оптимальное значение a_w составляет 0,85–0,87. Процессы посола и сушки по-

зволяют значительно снизить активность воды и, как следствие, замедлить развитие микробиологической порчи. Однако, немаловажным фактором является сохранение эластичной текстуры снеков и вкусовых показателей.

Перспективным направлением совершенствования технологий консервирования мясных продуктов является комбинирование нескольких сохраняющих факторов (барьеров): снижение активности воды (a_w), температуры, внесение консервирующих добавок, применение систем хранения в модифицированных газовых средах (МГС) или под вакуумом. Особенно актуальным становится поиск и внедрение технологий с применением безопасных ингибиторов микробиологической порчи мяса без применения искусственных консервантов [6].

Известно, что эффективным и безопасным способом сохранения качества ряда мясных продуктов, в том числе из мяса рыбы и птицы, является биоконсервирование с использованием некоторых видов молочнокислых бактерий: *Lactobacillus curvatus*, *Lactobacillus paracasei*, *Lactobacillus brevis*, *Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus rhamnosus*, *Lactobacillus sakei*, *Lactobacillus reuteri*, *Lactococcus lactis subsp. Lactis*, *Pediococcus acidilactici*, *Pediococcus pentosaceus*, *Leuconostoc gelidum*, *Leuconostoc mesenteroides* [7-9]. Перечисленные виды проявляют антагонистическую активность по отношению к широкому спектру грамположительных гнилостных бактерий и патогенов, в числе которых *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus*, *Enterococcus faecalis*, *Enterococcus faecium*, *Clostridium perfringens*, *Escherichia coli*, *Campylobacter jejuni* [10-13]. Биозащитные свойства данных культур обусловлены, главным образом, продуцированием

молочной и уксусной кислот, перекиси водорода и синтезируемых рибосомами антибиотикоподобных соединений – бактериоцинов [14-17]. Применение био-защитных культур в технологии мясных продуктов оказывает существенное влияние, как на продолжительность хранения, так и на качество производимой продукции за счет подавления жизнедеятельности нежелательной микрофлоры [18-21]. Стоит отметить, что несмотря на имеющийся опыт применения био-защитных культур, точные механизмы ингибирования микроорганизмов порчи мяса в комплексе с другими барьерными факторами в настоящее время изучены недостаточно.

В настоящее время при изготовлении вяленой продукции одной из основных задач является совершенствование процесса сушки. В связи с этим разрабатываются различные способы обезвоживания продукта, совершенствуется оборудование, подбираются оптимальные режимы – температура, влажность и продолжительность процесса – способные обеспечить микробиологическую безопасность мяса. Авторами Антиповой Л.В., Калач Е.В. и Горшковым А.Г. заявляется о сохранении незаменимых аминокислот мяса [22] путем использования щадящих режимов термической обработки при сушке. В свою очередь авторы Вольф Т.Т., Долгушина В.П. и др. для увеличения сроков годности мясных продуктов предлагают использовать ферментативный препарат протосубтилин, который повышает биологическую ценность готового продукта [23].

В работе Гиро Т.М., Тасмуханова Н. В., и Тормышовой В.Э. представлена разработанная рецептура мясосодержащих сыровяленых снеков для функционального питания с добавлением фитокомпонентов, пищевых волокон, бактериального препарата, соли профилактической йодированной, пряностей [24], которые не только обогащают продукт микроэлементами, но и пролонгируют его сроки годности.

Известно, что *Lactobacillus* сохраняют жизне-способность и бактериостатическую активность в диапазоне температур от 4 до 40°C. Поэтому применение длительной высокотемпературной обработки снеков приведет к полной инактивации био-защитных культур. Одновременно с этим низкотемпературные режимы инфракрасной сушки (ниже 40°C) не способны обеспечить безопасное санитарно-гигиеническое состояние продукта. Таким образом, для выявления эффективности влияния био-защитных культур на замедление развития микрофлоры, вызывающей порчу мясных снеков, и достижения максимального синергического эффекта в сочетании с другими факторами, необходимо исследовать жизнеспособность культуры на каждой стадии технологической обработки, подбирая экспериментально температуру и продолжительность процессов.

Ранее нами проведены исследования жизне-деятельности *Lactobacillus curvatus* и *Pediococcus acidilactici* в посоле куриных снеков и выявлено, что в посолочных растворах с содержанием поваренной

соли около 7% *Lactobacillus curvatus* были более жизне-способны, чем *Pediococcus acidilactici* [25].

Цель настоящей работы: исследовать барьерные свойства культуры *Lactobacillus curvatus* в процессе посола, сушки и хранения куриных снеков.

Методология. Для выполнения поставленной цели использовали лиофилизированный одноштаммовый препарат культуры *Lactobacillus curvatus* B-LC-48 SafePro («Chr. Hansen»). Модельные образцы снеков изготавливали из охлажденного филе цыплят-бройлеров. Первичная обработка сырья включала последовательно мойку охлажденного куриного филе (ЗАО «Петелинская птицефабрика») в холодной воде, подсушку и нарезку на ломтики (слайсы) толщиной от 0,5 до 1 см. Полученные слайсы солили мокрым способом при соотношении массы продукта и посольного раствора 3:1. Рецептура посолочного раствора включала поваренную соль (7,0%), сахар (3,5%), воду (89,0%). Лيوфилизированный препарат *Lactobacillus curvatus* вносили в посолочный раствор в количестве 0,1–0,2 % от массы сырья в соответствии с рекомендациями производителя. Посол осуществляли при температуре 4±2°C до достижения диффузионного равновесия.

В процессе посола мясных полуфабрикатов исследовали характер жизнедеятельности *Lactobacillus curvatus* путем микроскопирования фиксированных препаратов (мазков-отпечатков) с поверхности мяса [26-28]. Для определения исходного уровня обсемененности микрофлорой куриного филе, а также для установления динамики развития микрофлоры при посоле мяса, проводили микроскопирование мазков-отпечатков. Для микроскопирования полученных фиксированных препаратов использовали бинокулярный микроскоп Eclipse с камерой TC-100 (1600× увеличение), цифровую камеру IS-500 и программу Микроанализ Foto. Определение динамики развития микроорганизмов проводили статистическим методом. В 10 полях зрения по микрофотографиям подсчитывали палочки культуры.

По завершении посола модельный образец, на поверхности которого наблюдался наиболее активный рост *Lactobacillus curvatus*, обрабатывали сухой пряно-ароматической смесью «Душистая» (0,15% от массы сырья), состоящей из черного молотого перца, кориандра, базилика и паприки в экспериментально подобранном соотношении (0,5:1:1:1). Обработанные полуфабрикаты сушили с использованием различных температур в диапазоне от 30 до 45°C в инфракрасном сушильном шкафу «Универсал–УНИК–1» в течение 6-8 ч. Для сушки подготовленные слайсы предварительно раскладывали ровным тонким слоем на специальные сетки. При выборе режимов сушки изучали влияние температуры на динамику показателя активности воды снеков на приборе Decagon PawKit water activity meter («Decagon Devices, Inc», США). Определение a_w в процессе сушки снеков производили с периодичностью 1 ч. После сушки готовые снеки охлаждали до температуры 20°C, упаковывали под вакуумом в барьерную полимерную пленку

и закладывали на холодильное хранение в течение 28 суток при температуре $(4\pm 2)^\circ\text{C}$. Контрольные образцы без обработки бактериальным препаратом и добавок пряно-ароматической смеси изготавливали и хранили аналогичным образом. Далее определяли органолептические и микробиологические показатели готовых изделий. Для их оценки отбирали пробы образцов до закладки на хранение, а также на 3-и, 7-е, 14-е и 28-е сутки. Органолептическую оценку качества куриных снеков проводили профильным методом с использованием балловой шкалы. Оценку микробиологической безопасности снеков при хранении осуществляли по показателю КМАФАнМ в соответствии с требованиями ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции» [29].

Для получения достоверных результатов опыты осуществляли не менее, чем в 3-х кратной повторности. Числовые значения, указанные в таблицах и на

графиках, представляют собой среднее арифметическое значение с достоверностью $P = 0,95$; доверительный интервал $\Delta \pm 10,0\%$.

Результаты. На рисунке 1 и 2 представлена микроскопическая картина отпечатков куриного филе в процессе посола. Установлено отсутствие посторонней микрофлоры на поверхности образцов до посола (рис. 1а и 2а). В образцах филе, посоленных с внесением препарата *Lactobacillus curvatus* в количестве 0,2 % от массы сырья, наблюдался более активный рост микроорганизмов (рис. 2г). Также отмечена взаимосвязь между временем посола и концентрацией культуры на поверхности продукта. Окончание процесса посола (9 ч) совпадает с наибольшей активностью культуры, о чем свидетельствует рисунок 2г, поэтому для приготовления снеков далее использовали образец соленого филе с *Lactobacillus curvatus* в количестве 0,2% от массы сырья.

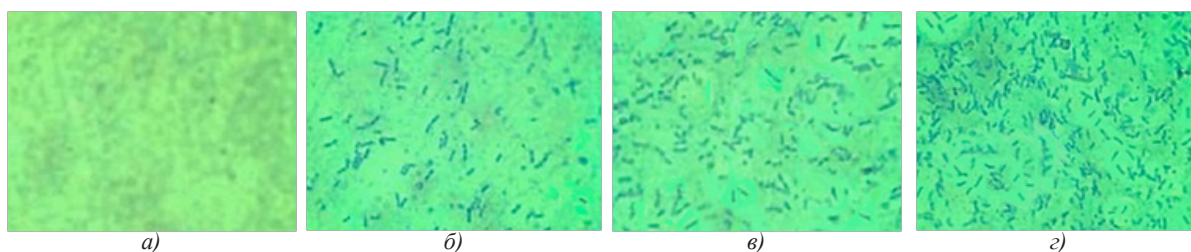


Рисунок 1 – Микроскопическая картина отпечатков с поверхности образцов куриного филе в процессе посола с 0,1% *Lactobacillus curvatus* от массы сырья: а) до посола; б) 3 ч; в) 6 ч; з) 9 ч (после посола)

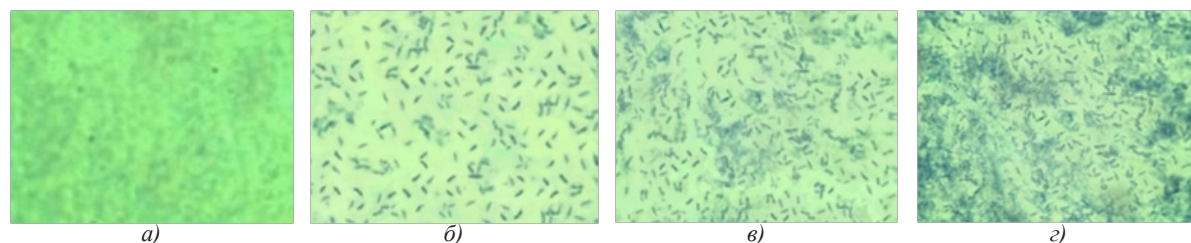


Рисунок 2 – Микроскопическая картина отпечатков с поверхности образцов куриного филе в процессе посола с 0,2% *Lactobacillus curvatus* от массы сырья: а) до посола; б) 3 ч; в) 6 ч; з) 9 ч (после посола)

На рисунке 3 приведены результаты исследований динамики активности воды в процессе сушки снеков. Установлено, что сушка при температуре 45°C снижает активность воды в готовом продукте до уровня 0,85, что является гарантией качества продукта при хранении. Однако внешний вид сухих снеков и их хрупкая и крошащаяся консистенция свидетельствуют о том, что температура 45°C является слишком «жесткой» относительно получения нужной текстуры продукта. Кроме того, температура 45°C является пороговой для жизнеспособности *Lactobacillus curvatus*.

Одновременно с этим следует отметить, что температура сушки 30°C не позволяет обеспечить необходимый уровень микробиологической безопасности снеков. Логично предположить, что рекомендуемая температура сушки куриных снеков, обработанных *Lactobacillus curvatus*, должна составлять около 40°C . Такой температурный режим

позволяет получать продукт, соответствующий критериям вяленого мяса по внешнему виду и консистенции в течение 8 ч сушки.

Для создания оригинальных вкусо-ароматических профилей куриных снеков была предложена смесь пряностей «Душистая», включающая черный молотый перец, кориандр, базилик и паприку. Экспериментально установлено, что содержание смеси «Душистая» в количестве 0,15% от массы сырья благоприятно влияет на их вкус, запах и микробиологические показатели. Технологическая рецептура образцов куриных снеков, обработанных *Lactobacillus curvatus* и смесью пряностей, представлена в таблице 1.

В результате проведенной органолептической оценки построены лепестковые диаграммы (профилограммы) органолептических показателей снеков. Для построения профилограмм предложена 5-балльная шкала (табл. 2).

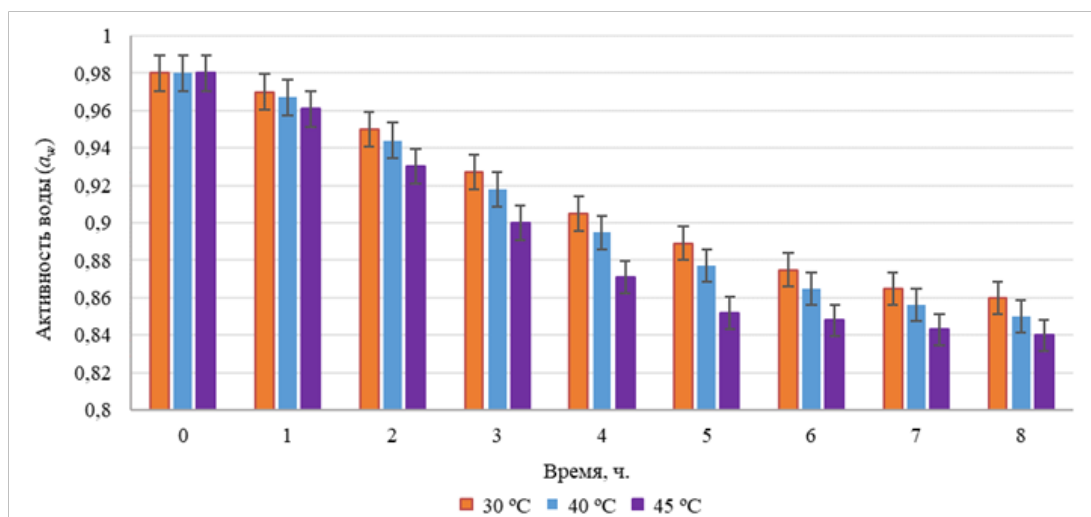


Рисунок 3 – Динамика активности воды в процессе сушки снеков, обработанных *Lactobacillus curvatus*

Таблица 1 – Технологическая рецептура снеков из мяса птицы

Наименование ингредиента	Норма, г на 100 г готового продукта
Филе куриное охлажденное	175,00
Соль	4,10
Сахар	2,05
Препарат <i>Lactobacillus curvatus</i>	0,35
Вода	51,89
Выход готового продукта	100,00
Смесь пряностей «Душистая»	0,260

Таблица 2 – Балльная шкала органолептической оценки качества куриных снеков

Показатель качества	Характеристика	Баллы
Внешний вид	Отличный. Изделия в форме ломтиков с чистой сухой поверхностью, без пятен, слипов и механических повреждений.	5
	Хороший. Изделия в форме ломтиков с чистой сухой поверхностью. Присутствуют незначительные сколы по краям и/или небольшие пятна локального характера.	4
	Средний. Поверхность изделий слегка увлажненная или пересушенная. Присутствуют незначительные сколы на поверхности и по краям и/или пятна локального характера	3
	Неприятный. Поверхность изделий увлажненная или подгорелая. Присутствуют значительные механические повреждения, пятна носят обширный характер.	2
	Очень неприятный. Изделия бесформенные с влажной или горелой поверхностью	1
Вкус	Вкусный, насыщенный, свойственный данному виду изделий (мясной, солоноватый, с привкусом внесенных компонентов), без постороннего привкуса.	5
	Достаточно вкусный, свойственный данному виду изделий (мясной, солоноватый, с привкусом внесенных компонентов), без постороннего привкуса.	4
	Недостаточно вкусный, ненасыщенный, соленый или пресный и/или присутствуют слабовыраженный кислый привкус, не связанный с порчей	3
	Безвкусный или очень пряный или соленый; с неприятным кислым привкусом	2
	С неприятным резким, порочащим и/или посторонним вкусом	1
Запах	Приятный, свойственный данному виду изделий, с выраженным ароматом мяса и внесенных компонентов, без постороннего запаха	5
	Приятный несильный, свойственный данному виду изделий, со слабовыраженным ароматом мяса и внесенных компонентов, без постороннего запаха.	4
	Недостаточно выраженный (без аромата) или специфически кислый (легкий) не связанный с порчей	3
	Неприятный, с очень сильно выраженным ароматом внесенных компонентов и/или с выраженным кислым запахом	2
	Плохой, с резким неприятным или посторонним запахом	1
Цвет	Равномерный, от светло-коричневого до коричневого, без пятен и потемнений	5
	То же, с незначительными (локальными) светлыми пятнами или мене яркий	4
	То же, со значительными (обширными) светлыми пятнами или туслый	3
	Неравномерный, темно-коричневый с сероватым оттенком или желтый	2
	Значительно неравномерный; бледный, темно-серый или несвойственный	1
Консистенция	Однородная (монолитная), плотная, нежесткая, некрошливая	5
	Однородная, менее плотная, нежесткая, некрошливая	4
	Однородная, менее плотная, нежесткая, незначительно крошащаяся	3
	Неоднородная, мягковатая волокнистая или жесткая хрупкая	2
	Неоднородная, мягкая, мажущаяся, рыхлая или очень жесткая и хрупкая	1

Результаты дегустации свежеприготовленных куриных снеков (рис. 4а), показали, что образцы, полученные с использованием 0,2% *Lactobacillus curvatus*, обладают более плотной консистенцией и улучшенным внешним видом по сравнению с контрольным образцом. Заметного влияния бактериальных культур на цвет, запах и вкус продукта не выявлено. Цвет снеков варьировался от светло-коричневого до темно-коричневого. Изделия имели приятный выраженный аромат вяленого мяса и свойственный солоноватый вкус. Самую высокую балльную оценку получили снеки, обработанные пряной смесью «Душистая», которая позволяет нивелировать неоднородность цвета поверхности продукта и скрыть незначительные механические повреждения (микротрещины). Кроме того, предложенная пряно-ароматическая композиция способствует усилению восприятия цвета, запаха и вкуса готового продукта у потребителей.

Органолептическая оценка снеков после 28 суток холодильного хранения при температуре (4 ± 2)°C (рис. 4б) показала, что наилучший результат показали образцы, обработанные 0,2% *Lactobacillus curvatus*

с использованием смеси «Душистая». Отклонения в их органолептических показателях являются малозаметными. У снеков, посоленных с добавлением 0,2% *Lactobacillus curvatus* без использования специй, цвет стал менее ярким, а аромат – слабывраженным.

В контрольном образце произошли более существенные изменения органолептических показателей, связанные с потускнением цвета поверхности, ослаблением мясного аромата и ухудшением консистенции (менее плотная и волокнистая), причины которых можно связать с процессами окисления и деятельностью протеолитических микроорганизмов. В целом, уровень органолептических показателей контрольного образца оставался удовлетворительным.

Результаты исследований динамики КМАФАнМ в куриных снеках показали, что на протяжении всего периода холодильного хранения этот показатель не превысил регламентируемого уровня (рис. 5). Согласно требованиям ТР ТС 021/2011 в сушеных продуктах из мяса птицы уровень КМАФАнМ не должен превышать $1,0 \times 10^4$ КОЕ/г.

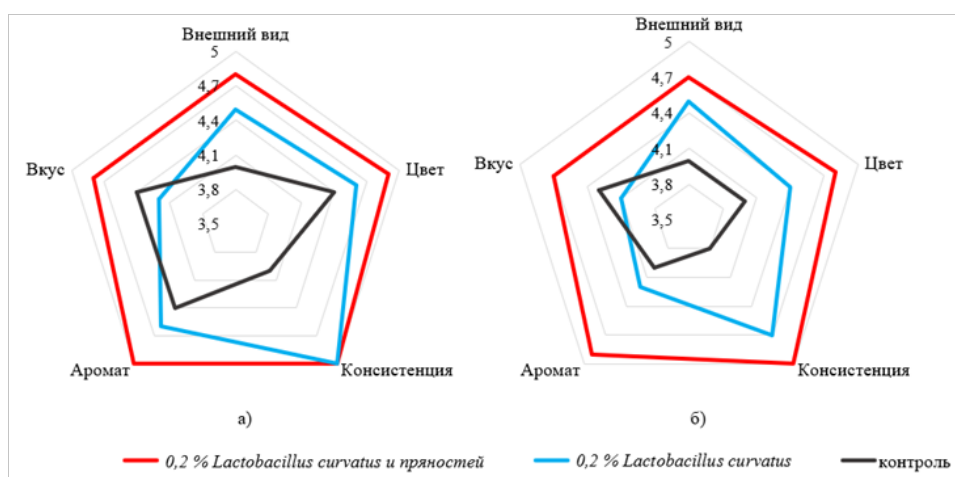


Рисунок 4 – Органолептические профили куриных снеков: а) до хранения; б) после 28 суток хранения

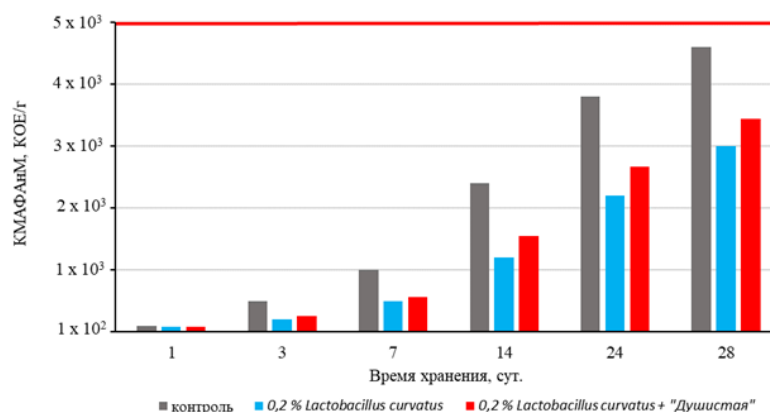


Рисунок 5 – Динамика КМАФАнМ в образцах куриных снеков при холодильном хранении (28 сут; 4 ± 2 °C)

Выявлено, что уровень КМАФАнМ в контрольных образцах и образцах, обработанных *Lactobacillus curvatus*, ниже примерно в 1,5 раза, что может

свидетельствовать о проявлении барьерного эффекта культуры *Lactobacillus curvatus*.

Обсуждение. Установлено отсутствие посторон-

ней микрофлоры на поверхности образцов куриного филе в процессе посола с добавками препарата *Lactobacillus curvatus* в количестве 0,2% от массы сырья, что свидетельствует о проявлении барьерных свойств культуры по отношению к микроорганизмам, вызывающим порчу продуктов.

Разработана технологическая рецептура снеков из мяса птицы. Предложена смесь пряностей «Душистая», включающая черный молотый перец, кориандр, базилик и паприку. Показано, что добавки смеси в количестве 0,15% от массы сырья благоприятно влияют на их вкус, запах и микробиологические показатели снеков при хранении. Предложена балльная шкала органолептической оценки качества разработанных куриных снеков.

Рекомендуемая температура сушки куриных снеков, обработанных *Lactobacillus curvatus*, составляет 40°C. Такой температурный режим позволяет получать продукт, соответствующий критериям вяленого мяса по внешнему виду и консистенции в течение 8 ч сушки, достичь уровня активности воды 0,85 с сохранением жизнеспособности *Lactobacillus curvatus*.

Выводы. Таким образом, предложенный способ обработки препаратом *Lactobacillus curvatus* (0,2% от массы сырья) куриных слайсов в посоле при соотношении массы продукта и посольного раствора 3:1 и составе посолочного раствора: поваренная соль (7,0%), сахар (3,5%), вода (89,0%), последующей добавкой смеси пряностей «Душистая» (0,15% от массы сырья и дальнейшей сушки куриных снеков при температуре 40°C в течение 8 часов позволяет сохранять органолептические и микробиологические показатели качества куриных снеков, упакованных под вакуумом в барьерную полимерную пленку, при холодильном хранении (4±2°C) до 28 суток на требуемом уровне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Семёко Г.В. Мировой продовольственный рынок: современные вызовы и перспектив // Экономические и социальные проблемы России. – 2023. – № 1. – С. 19-43.
2. Химический состав мяса: справочные таблицы общего химического, аминокислотного, жирнокислотного, витаминного, макро- и микроэлементного составов и пищевой (энергетической и биологической) ценности мяса / Лисицын А.Б., Чернуха И.М., Кузнецова Т.Г., Орлова О.Н., Мкртчян В.С. – Москва: ВНИИМП, 2011. – 102 с.
3. Обзор российского и мирового рынков мяса и мясной продукции по состоянию на 14.03.2023 года. ГКУ КК «Кубанский сельскохозяйственный информационно-консультационный центр». 2023 [Электронный ресурс] – Режим доступа http://www.kaicc.ru/sites/default/files/myaso_rf_14.03.2023.pdf?ysclid=lm7thfrt8o425738747 (Дата обращения 10.09.2023)
4. Петрунина И.В. Состояние отечественного рынка мяса и мясных продуктов за I полугодие 2021 года // Рынок мяса и мясных продуктов. – 2021. – № 7. – С. 2-20.
5. Макарова Г.В. Роль барьера «Активность воды» в управлении безопасностью пищевых продуктов // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства. – 2018. – № 20. – С. 224-227.
6. Корж А.П., Базарнова Ю.Г. Преимущества исполь-

зования биоконсервантов в мясной отрасли // Мясные технологии. – 2016. – № 5(161). – С. 40-43.

7. Машенцева Н.Г., Хорольский В.В., Синецкий С.П., Дорофеева Е.С., Бучинская А.Г., Каниковская А.А. Скрининг молочнокислых микроорганизмов – продуцентов бактериоцинов, перспективных для использования в мясной промышленности // Биотехнология. – 2006. – № 6. – С. 20-26.
8. Food Biopreservation / Antonio Galvez, María José Grande Burgos, Rosario Lucas López, Rubén Pérez Pulido. – Springer Science + Business Media. 2014. – 118 p.
9. Zagorec M., Phampomier-Verges M.-C. *Lactobacillus sakei*: A starter for sausage fermentation, a protective culture for meat products // Microorganisms. – 2017. – N. 5(3). – P. 56.
10. Lücke, K.F. Utilization of microbes to process and preserve meat // Meat Science. – 2000. – Vol. 56. – N.2. – P. 105-115.
11. Protective cultures, antimicrobial metabolites and bacteriophages for food and beverage biopreservation / Christophe Lacroix (Edited). – Woodhead Publishing Limited. 2011. – 501 p.
12. Siedler S., Balti R., Neves A.R. Bioprotective mechanisms of lactic acid bacteria against fungal spoilage of food // Current Opinion in Biotechnology. – 2019. – N. 56. – P. 138-146.
13. Kumariya R., Garsa A.K., Rajput Y., Sood S., Akhtar N.; Patel S. Evaluation and Exploration of Lactic Acid Bacteria for Preservation and Extending the Shelf Life of Fruit // International Journal of Fruit Science. – 2018. – Vol. 18. – N. 4. – P. 355-368.
14. Advances in biopreservation / Edited by John G. Baust, John M. Baust. – Taylor & Francis Group. – 2007. – 411 p.
15. Bacteriocins of lactic acid bacteria: microbiology, genetics, and applications / Edited by Luc de Vuyst and Erick J. Vandamme. – Springer Science + Business Media. 1994. – 534 p.
16. Kumariya R., Garsa A.K., Rajput Y., Sood S., Akhtar N.; Patel S. Bacteriocins: Classification, Synthesis, Mechanism of Action and Resistance Development in Food Spoilage Causing Bacteria // Microb. Pathog. 2019. – N. 128. – P. 171-177.
17. Woraprayote W., Malila Y., Sorapukdee S., Swetwathana A., Benjakul S., Visessanguan W. Bacteriocins from lactic acid bacteria and their applications in meat and meat products // Meat Science. – 2016. – N.120. – P. 118-132.
18. Алдарова Е.В., Москвичева Е.В., Тимошенкова И.А. Перспективы использования нетрадиционного сырья и биозащитных культур при производстве полуфабрикатов из птицы // Здоровое питание и нутриционная поддержка: медицина, образование, инновационные технологии: сборник материалов XVI Всероссийского форума, Санкт-Петербург, 12-13 ноября 2021 года / Санкт-Петербургское региональное отделение общественной организации «Союз педиатров России», Союз медицинских работников Санкт-Петербурга и Северо-Западного региона. – Санкт-Петербург: Б. и., 2021. – С. 7-11.
19. Гнилицкий В.Г., Шепиашвили Ю.В., Гребенюк А.А. [и др.] Применение барьерных биотехнологий при производстве кулинарной продукции // Неделя науки СПбПУ: Материалы научной конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 13-19 ноября 2017 года. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 2017. – С. 122-125.
20. Патент № 2520018 С1 Российская Федерация, МПК А23L 1/31, А23L 1/315. Способ производства сырых продуктов из мяса птицы: № 2013100601/13; заявл. 11.01.2013; опубл. 20.06.2014 / В. Н. Махонина, В. П. Агафоновичев, В. В. Корнев [и др.]; заявитель Государственное научное учреждение Всероссийский научно-исследовательский институт птицеперерабатывающей промышленности Россельхозакадемии (ГНУ ВНИИПП Россельхозакадемии)
21. Bazarnova J., Korableva N., Ozerova O., Moskvicheva E. Biochemical composition and quality of herring preserves with addition of bio-protective cultures // Agronomy Research. – 2020. – Vol. 18. – No. Special Issue 3. – P. 1629-1639. – DOI 10.15159/AR.20.098.
22. Антипова Л.В., Калач Е.В., Горшков А.Г. Технология изготовления чипсов из прудовой рыбы // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – Т. 7. – № 9. – С. 142-144.
23. Патент № 2305956 С2 Российская Федерация, МПК А23L 1/31, А23L 1/314, А23L 1/317 Способ получения

натуральных мясных продуктов длительного срока хранения: № 2005114136/13: заявл. 27.04.2005; опубл. 20.09.2007 / Т.Т. Вольф, В.П. Долгушина, В.А. Углов, С.Н. Перфильева, Е.В. Бородай; заявитель Государственное научное учреждение Сибирский научно-исследовательский и проектно-технологический институт переработки сельскохозяйственной продукции Сибирское отделение Российской академии сельскохозяйственных наук

24. Гиро Т.М., Тасмуханов Н.В., Тормышова В.Э. Разработка технологии мясосодержащих снежков с пролонгированным сроком хранения // Международная научно-практическая конференция, посвященная памяти Василия Матвеевича Горбатова. – 2017. – № 1. – С. 79-80.

25. Галатюк, Н.Н. Применение бактериальных стартовых культур для производства снежков из мяса птицы // Актуальная биотехнология. – 2018. – №3 (26). – С. 547.

26. ГОСТ 23392–2016. Мясо. Методы химического и микроскопического анализа свежести. Изд. офиц. М.: Стандартинформ. 2019. – 8 с.

27. Микробиологический анализ мяса, мяса птицы и яиц-продуктов /Под ред. Дж. К Мида. Пер с англ. СПб.: Профессия. 2008. – 384 с.

28. Хоулт, Дж. Определитель бактерий Берджи: в 2 т. / Дж. Хоулт. – М.: Мир Год. – 2005. – Т. 2. – 670 с.

29. ГОСТ 10444.15–94. Продукты пищевые. Методы определения количества мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов. Изд. офиц. М.: Стандартинформ. 2010. – 5 с.

Статья поступила в редакцию 18.09.2023

Статья принята к публикации 15.12.2023

УДК 621.941

EDN: ВНСJNT

**АНАЛИЗ СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ «МНОГОМЕСТНАЯ
МАШИНА – ОПЕРАТОР – АВТОМАТИЧЕСКИЙ МАНИПУЛЯТОР»**

© Автор(ы) 2023

SPIN: 8595-4447

AuthorID: 839997

ORCID: 0000-0003-3506-3303

МУРАШКИНА Оксана Александровна, старший преподаватель кафедры «Пищевые производства»

Пензенский государственный технологический университет

(440028, Россия, г.Пенза, пр. Байдукова/ул.Гагарина, 1а/11, e-mail:xeniam13@yandex.ru)

SPIN:4884-0473

AuthorID: 839818

ORCID: 0000-0001-7952-359X

САРАФАНКИНА Елена Александровна, старший преподаватель кафедры «Пищевые производства»

Пензенский государственный технологический университет

(440028, Россия, г.Пенза, пр. Байдукова / ул.Гагарина, 1а/11, e-mail:satel18@mail.ru)

SPIN: 9220-0752

AuthorID: 254439

ORCID: 0000-0001-6623-7228

АВРОРОВ Валерий Александрович, доктор технических наук,

профессор кафедры «Пищевые производства»

Пензенский государственный технологический университет

(440028, Россия, г.Пенза, пр. Байдукова/ул.Гагарина, 1а/11, e-mail:v_avrorov@bk.ru)

Аннотация. Автоматизация технологических процессов является насущной необходимостью современных производств в различных отраслях промышленности. Создание нового автоматизированного оборудования требует обоснования и решения ряда технических задач, связанных с обеспечением высокой надежности и эффективности средств автоматизации, используемых на данном оборудовании. Особенно это касается применения мобильных или стационарных средств автоматизации в помощь оператору на многоместных машинах с большим числом однотипных рабочих мест. Появление локальных отказов или сбоев на таких местах снижает производительность оборудования и требует их быстрого устранения оператором или автоматизированными устройствами, составляющими вместе с машиной единый комплекс. Такой комплекс может рассматриваться как система массового обслуживания, в которой появляются заявки на обслуживание рабочих мест в виде сбоев в работе, локальных отказов или сигналов на съем готовой продукции с каждого рабочего места и осуществляется их устранение оператором и автоматическим устройством. Примером системы массового обслуживания в пищевой промышленности могут служить фасовочно-упаковочные машины пищевой продукции и машины для ее формования, в которых сбой в работе могут проявляться в виде брака маркировки, неправильного нанесения или наклейки этикеток, пропуска в подаче тары и т.п. а также в виде отклонений от заданной массы формируемых продуктов. Итогом решения задач массового обслуживания является сокращение времени обслуживания таких заявок. В настоящей статье проведен анализ двухканальной системы массового обслуживания с неограниченной очередью на примере исследования комплекса «Многоместная машина – оператор – автоматический манипулятор». Получены характеристики системы при работе машины и ее обслуживании оператором и автоматическим манипулятором. Определены численные значения плотности потока отказов рабочих мест, загрузки системы, среднего времени устранения отдельного отказа. Показано, что автоматический манипулятор позволяет существенно снизить нагрузку оператора.

Ключевые слова: система массового обслуживания с неограниченной очередью, характеристики системы, автоматический манипулятор, эффективность использования манипулятора.

**ANALYSIS OF THE QUEUING SYSTEM "MULTI-SEAT MACHINE –
WORKER – AUTOMATIC MANIPULATOR"**

© The Author(s) 2023

MURASHKINA Oxana Aleksandrovna, master, senior lecturer of the department of “Food production”

Penza State Technological University

(440028, Russia, Penza, pr.Baidukova/Gagarin st. 1a/11, e-mail: xeniam13@yandex.ru)

SARAFANKINA Elena Aleksandrovna, master, senior lecturer of the department “Food production”

Penza State Technological University

(440028, Russia, Penza, pr.Baidukova/Gagarin st. 1a/11, e-mails: satel18@mail.ru)

AVROROV Valery Aleksandrovich, doctor of technical sciences, professor of the department of “Food production”

Penza State Technological University

(440028, Russia, Penza, pr. Baidukova/Gagarin st. 1a/11, e-mail: v_avrorov@bk.ru)

Abstract. Automation of technological processes is an urgent need for modern production in various industries. The creation of new automated equipment requires justification and solution of a number of technical tasks related to ensuring high reliability and efficiency of automation tools used on this equipment. This is especially true for the use of mobile or stationary automation tools to help the operator on multi-seat machines with a large number of similar jobs. The appearance of local failures or failures in such places reduces the productivity of equipment and requires their rapid elimination by the operator or automated devices that make up a single complex together with the machine. Such a complex can be considered as a queuing system in which requests for workplace maintenance appear in the form of failures, local failures or requests for the removal of finished products from each workplace and their elimination is carried out by the operator and an automatic device. The result of solving such queuing tasks is to reduce the service time of such applications. In this article, an analysis of a two-channel queuing system with an unlimited queue is carried out on the example of a study of the complex "Multi-seat machine - operator - automatic manipulator". The characteristics of the system during the operation of the machine and its maintenance by the operator and the automatic manipulator are obtained. Numerical values of the density of the flow of workplace failures, system load, and the average time to eliminate an individual failure are determined. It is shown that the automatic manipulator can significantly reduce the operator's load.

Keywords: queuing system with unlimited queue, system characteristics, automatic manipulator, efficiency of using the manipulator.

Для цитирования: Мурашкина О.А. Анализ системы массового обслуживания «многоместная машина – оператор – автоматический манипулятор» / О.А. Мурашкина, Е.А. Сарафанкина, В.А. Авроров // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 12. – № 4(64). – С. 150-153. – EDN: BHCJNT.

Введение. В различных отраслях промышленности имеется ряд технических задач, для решения которых используются методы теории массового обслуживания. Такие задачи возникают в тех случаях, когда поступающие требования (заявки на обслуживание) не могут быть сразу удовлетворены каналами обслуживания, поэтому накапливаются и образуют очередь [1-3]. В качестве каналов выступают физические лица (операторы) или средства автоматизации (мобильные или стационарные автоматические манипуляторы) [4, 5].

Целью настоящей работы являлась оценка целесообразности использования передвижного автоматического манипулятора при обслуживании группы однотипных многоместных машин с позиции возможного снижения объема обслуживания рабочих мест, выполняемого вручную оператором.

Методология. Характерными примерами систем массового обслуживания (СМО) являются эксплуатируемые в текстильной промышленности кольцевые или пневмомеханические прядильные машины с большим числом рабочих мест (веретен или камер) [6]. На этих машинах заявками на обслуживание служат обрывы пряжи, появляющиеся при ее намотке на шпули веретен и требующие устранения, а также операции ручного или механизированного сьема с веретен наработанных початков и насаживания на веретена новых шпуль [7-11].

Другим примером является работа поточных линий по производству различных видов пищевых изделий, когда перерабатываются разные виды сырья или когда готовую продукцию необходимо упаковать за минимально возможное время. Заявками здесь будут являться поступающая на упаковку продукция, пищевые компоненты или технологические машины [12-14].

В химической промышленности примером могут служить многоместные машины для обработки неоднородных жидких сред (суспензий и эмульсий), при эксплуатации которых на каждом рабочем месте может возникнуть поток отказов, которые невозможно быстро устранить, а также отказы однотипных пар вращения, работающих в условиях сухого трения [12, 15-17].

В области переработки промышленных отходов, например, переработки пластиковой тары и упаковки, заявками могут служить объемы поступающих на измельчение видов отходов (отходы полиэтилена, полистирола, поливинилхлорида и других видов пластиков), которые требуют раздельной обработки [18, 19].

Независимо от вида обрабатываемой продукции методика решения задач массового обслуживания практически одинакова, и ее конечной целью является сокращение времени обслуживания поступающих заявок.

При эксплуатации многоместного оборудования при использовании на нем автоматического передвижного манипулятора в помощь оператору представляет теоретический и практический интерес исследование модели двухканального обслуживания системы, в которой одним каналом служит оператор, вторым – автоматический манипулятор.

Результаты. В процессе выработки продукции при работе многоместной машины последовательность отказов на каждом отдельном рабочем месте и машине в целом будет носить случайный характер.

Каждый из отказов с какой-то вероятностью снижает долю исправно работающих мест. Оператор и манипулятор устраняют эти отказы или сбои, однако некоторые из них могут быть не устранены. Например, автоматический манипулятор

не может устранить отказ, обусловленный сбоем в подаче сырья на какое-то рабочее место и т.п. Очевидно, успешно устраненные отказы будут образовывать свой поток.

При проведении анализа двухканальной СМО комплекса «Машина – оператор – манипулятор» примем следующие допущения:

- поток отказов является простейшим;

- все выпуски машин идентичны;
- отказы в виде крупных поломок отсутствуют;
- плотность потока локальных отказов постоянна;
- время обслуживания одного рабочего места (время устранения отказа) оператором и манипулятором имеет показательное распределение.

На рисунке 1 изображен граф состояний СМО «Машина – оператор – манипулятор».

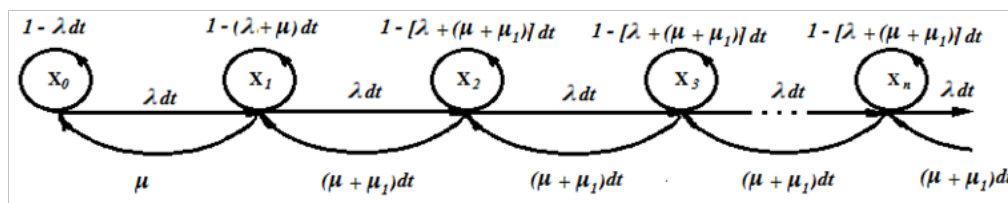


Рисунок 1 – Граф состояний двухканальной системы «Машина – оператор – манипулятор» с неограниченной очередью

Очевидно, данная система в любой момент времени будет иметь $n+2$ состояний (n требований в очереди и одно или два на обслуживании).

Для данного графа можно записать

$$\begin{cases} \lambda p_0 = \mu p_1 \\ (\lambda + \mu) p_1 = \lambda p_0 + (\mu + \mu_1) p_2 \\ [\lambda + (\mu + \mu_1)] p_n = \lambda p_{n-1} + (\mu + \mu_1) p_{n+1} \\ \sum_{i=0}^{\infty} p_i = 1 \end{cases}, \quad (1)$$

λ – плотность потока отказов; μ – плотность потока отказов, устраненных оператором; μ_1 – плотность потока отказов, устраненных манипулятором; p_0 – вероятность того, что в системе отсутствуют отказы; p_n – вероятность того, что в системе имеется n отказов.

Решение системы (1) дает

$$p_n = \psi \rho^n p_0, \quad (2)$$

где ρ – загрузка системы, $\psi = \frac{\lambda}{\mu}$; $\rho = \frac{\lambda}{\mu + \mu_1}$;

$$\rho < 1; p_0 = \frac{1 - \rho}{\psi}; p_n = \frac{\rho^n (1 - \rho)}{\psi}.$$

Число отказов в системе

$$L_c = \frac{\rho}{\psi(1 - \rho)} \quad (3)$$

Число отказов в очереди

$$L_{оч} = \frac{\{\rho[1 - \psi(1 - \rho)]\}}{1 - \rho} \quad (4)$$

Для СМО с неограниченной очередью связь между средним числом отказов и средним временем ожидания записывается как

$$\bar{L} = \lambda \bar{T}. \quad (5)$$

Среднее время ожидания отказа в очереди

$$\bar{T}_{оч} = \frac{\{\rho[1 - \psi(1 - \rho)]\}}{\lambda \psi(1 - \rho)}. \quad (6)$$

Среднее время нахождения отказа в системе

$$\bar{T}_c = \frac{\rho}{\lambda \psi(1 - \rho)}. \quad (7)$$

Средняя продолжительность обслуживания одного отказа

$$\bar{T} = \frac{1}{\mu}. \quad (8)$$

Пример: Для определения характеристик двухканальной СМО воспользуемся известными числовыми данными, полученными из анализа эксп-

луатации одноканальной системы «Многоместная машина – оператор».

Для одноканальной системы имеем $\lambda=10$ (ед. времени)⁻¹, $\mu=12$ (ед. времени)⁻¹. Интенсивность устранения одного отказа манипулятором по данным испытаний экспериментального образца манипулятора в 3 раза меньше, чем оператором и составляет $\mu_1=4$ (ед. времени)⁻¹.

Подставляя эти данные в приведенные выше формулы, находим численные значения параметров искомой системы:

- загрузку двухканальной системы

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu + \mu_1} = 0,625;$$

- отношение интенсивности поступающего потока отказов к продолжительности их устранения

$$\psi = \frac{\lambda}{\mu} = 0,833;$$

- среднее число отказов в системе

$$L_c = \frac{\rho}{\psi(1 - \rho)} = 2,0$$

- среднее число отказов в очереди

$$L_{оч} = \frac{\{\rho[1 - \psi(1 - \rho)]\}}{1 - \rho} = 1,15.$$

- среднее время ожидания отказа в системе

$$\bar{T}_c = \frac{\rho}{\lambda \psi(1 - \rho)} = 0,2 \text{ ед. времени};$$

- среднее время нахождения отказа в очереди

$$\bar{T}_{оч} = \frac{\{\rho[1 - \psi(1 - \rho)]\}}{\lambda \psi(1 - \rho)} = 0,14 \text{ ед. времени}.$$

- среднее время устранения одного отказа оператором

$$\bar{T}_p = \frac{1}{\mu} = 0,08 \text{ ед. времени}$$

- среднее время устранения одного отказа манипулятором

$$\bar{T}_m = \frac{1}{\mu_1} = 0,25 \text{ ед. времени}.$$

Обсуждения. Оценим с помощью метода статистического (имитационного) моделирования [20] эффективность использования манипулятора в СМО «Многоместная машина – оператор – автоматический манипулятор».

Обозначим момент освобождения канала P (оператор) через t_1^P . За начальный момент расчета примем время поступления первого отказа $T_1=0$. В этот момент оба канала свободны, т.е. $t_1^P = t_1^M = T_1$, где t_1^M – момент освобождения от работы канала M (манипулятора).

Пусть первый отказ устраняет оператор в течение времени t_{01}^P . После его устранения время t_1 заменяется на $t_2^P = T_1 + t_{01}^P$ и прибавляется единица к счетчику выполненных заявок. Далее рассматривается следующий отказ.

После обслуживания k заявок рассматривается момент поступления $(k+1)$ заявки, который вычисляется как $T_{k+1} = T_k + \tau_k$, где τ разыгрывается по формуле

$$\tau = -\ln \frac{\gamma}{\lambda}$$
 где γ – случайное число, выбираемое из таблицы случайных чисел или получаемое на ЭВМ.

Если к моменту времени $t_1^P < T_{k+1}$, то канал свободен и может заняться устранением следующего отказа. Тогда t_2^P заменяется на $t_3^P = T_{k+1} + t_{01}^P$, прибавляется единица к счетчику выполненных заявок и рассматривается следующая.

Если $t_1^P > T_{k+1}$, то оператор будет занят устранением отказа, и проверяется занятость манипулятора $t_1^M < T_{k+1}$. Если это условие выполняется, то t_1^M заменяется на $t_1^M = T_{k+1} + t_{01}^M$, где t_{01}^M – время устранения отказа манипулятором. Добавляется единица к счетчику выполненных заявок и рассматривается следующая заявка.

Может возникнуть ситуация, когда и оператор, и манипулятор будут заняты устранением отказов. В этом случае возникающие отказы будут становиться в очередь для устранения.

Разыгрывание повторяется N раз, и результаты всех опытов усредняются

$$M_{XP} = 1/N \sum_{j=0}^N X_{Pj}$$

$$M_{XM} = 1/N \sum_{j=0}^N X_{Mj}$$

$$M_{X_{отк}} = 1/N \sum_{j=0}^N X_{откj}$$

где X_{Pj} , X_{Mj} , $X_{откj}$ – соответствующие значения j -го опыта.

С учетом данных приведенного выше примера разыгрывался момент наступления k -го отказа

$$\tau_k = -\ln \frac{\gamma}{\lambda}$$

и время его устранения оператором $\tau_k^P = -\ln \frac{\gamma}{\mu}$.

Время устранения отказов манипулятором для сокращения вычислений было принято постоянным $\tau_k^M = 0,25$ ед. времени. Всего было разыграно появление 120 отказов.

Усредненные значения составили $X_{Pj} = 0,45$, $X_{Mj} = 0,2$, $X_{откj} = 0,35$.

Выводы. Результаты проведенных расчетов по принятым в исследовании моделям показывают, что автоматический манипулятор способен сни-

зить нагрузку оператора примерно на 35%, что является существенным фактором по уменьшению доли ручного труда в производстве и показывает на необходимость механизации обслуживания рабочих мест на многоместном технологическом оборудовании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Солнышкина, И.В. Теория систем массового обслуживания – Комсомольск на Амуре: ФГБОУ ВПО КнАГТУ, 2015. – 76 с.
2. Карташевский, В.Г. Основы теории массового обслуживания – М: Горячая линия Телеком, 2013. – 130с.
3. Белый, Е.К. Введение в теорию массового обслуживания – Петропавловск: ПетрГУ, 2014, – 76с.
4. Шаумян Г.А. Комплексная автоматизация производственных процессов. – М: Машиностроение, 1973.- 640с.
5. Авроров В.А., Кившенко А.М. Автоматизация кольцевых прядильных машин. – М: Легпромбытиздат, 1986. – 104с.
6. Хавкин В.П., Молчанов А.С. Применение теории массового обслуживания в текстильной промышленности. – М: Легкая индустрия, 1974. – 60с.
7. Automatischer Kopswechsel an Ringspinnmaschinen. – ITB Spinnerei, 1979. – №2. – с. 269-270/
8. Авроров, В.А., Привалов И.С. Об использовании автоматических манипуляторов для устранения обрывов пряжи на пневмомеханических прядильных машинах / Известия вузов. Технология текстильной промышленности, №4, 1983. – С.6-12.
9. Авроров В.А., Никифоров Ю.Н. Обслуживание группы прядильных машин с помощью автосъемника початков встроенного типа / Известия вузов. Технология текстильной промышленности. №5, 1983. – С.3-5.
10. Иванов Г.М., Исаева К.А., Сашкин В.П., Пастухов В.Т. О массовой заправке высокоскоростных пневмопрядильных машин. Сборник научных трудов «Вопросы исследования и проектирования машин прядильного оборудования». – М: ВНИИЛТЕКМАШ, 1983. – С.76-83.
11. Авроров В.А. Оценка эффективности работы автосъемника початков встроенного типа. Сборник научных трудов «Вопросы исследования и проектирования машин прядильного оборудования». – М: ВНИИЛТЕКМАШ, 1983. – С.6-68.
12. Авроров В.А. Процессы и аппараты пищевых производств. – Москва-Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. – 800с.
13. Авроров В.А. Процессы и оборудование: моделирование, исследования, инновационные конструкторские разработки. – М: ЮРАЙТ, 2021. – 260с.
14. Авроров В.А. Упаковочные материалы и фасовочно-упаковочное оборудование пищевых продуктов. – М: ЮРАЙТ, 2022. – 283с.
15. Авроров В.А. О высокоскоростном роторном диспергировании жидких сред / Химическое и нефтегазовое машиностроение, 2019. №10. – С.12-14.
16. Авроров В.А., Мурашкина О.А. Экспериментальная оценка влияния некрутости пар вращения, эксплуатируемых в условиях сухого трения, на величину момента силы трения. / Химическое и нефтегазовое машиностроение, 2020. №11. – С.28-30.
17. Авроров В.А., Мурашкина О.А., Сарафанкина Е.А. Выбор рационального сочетания антифрикционных обработок пар вращения в условиях сухого трения / Химическое и нефтегазовое машиностроение, 2020. – №12. – С.31-34.
18. Авроров В.А. Переработка отходов пищевых производств. Технология и оборудование. – Москва-Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. – 204с.
19. Голубев И.Г., Шванская И.А., Коноваленко Л.Ю., Лопатников М.В. Рециклинг отходов в АПК. – М: ФГБНУ Росинформротех, 2011. – 296с.
20. Паньгина Н.Н., Паньгин А.А. Статистическое моделирование: метод Монте-Карло./ Компьютерные инструменты в образовании. – №5. – 2002. – С30-43.

Статья поступила в редакцию 12.10.2023

Статья принята к публикации 15.12.2023

УДК 664.681.1:633.689

EDN:DZJPFJ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОРОШКА МЕСКИТА В ПРОИЗВОДСТВЕ БЕЗГЛЮТЕНОВОГО ПЕЧЕНЬЯ

© Автор(ы) 2023

SPIN: 1518-9343

AuthorID: 559899

ORCID: 0000-0002-5154-7095

ResearcherID: P-8789-2017

ScopusID: 56724069900

НИЛОВА Людмила Павловна, кандидат технических наук, доцент Высшей школы сервиса и торговли

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

(194064, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, e-mail: nilova_l_p@mail.ru)

SPIN: 1344-9397

AuthorID: 376408

ORCID: 0000-0002-8081-6688

ResearcherID: P-2675-2017

ScopusID: 57194266131

МАЛЮТЕНКОВА Светлана Михайловна, кандидат технических наук,

доцент Высшей школы сервиса и торговли

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

(194064, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, e-mail: malutesha66@mail.ru)

Аннотация. В статье представлены результаты исследований химического состава порошка (муки) из целых бобов мескита из Перу и его использование в рецептуре безглютенового песочного печенья. Порошок мескита характеризовался высоким содержанием нерастворимых пищевых волокон и сахарозы, невысоким содержанием белков и низким содержанием липидов. Для производства безглютенового песочного печенья 10 и 20% безглютеновой муки (кукурузно-рисовая) в рецептуре заменяли порошком мескита, что привело к изменению интенсивности сладкого вкуса и цвета от светло-коричневого до коричневого. В печенье в системе *CIE Lab* на спектрофотометре *SM-5 Konica Minolta* определяли колориметрические характеристики: светлота L^* и координаты цвета – a^* и b^* ; геометрические размеры (диаметр, толщина), влажность и набухаемость стандартными методами, прочность на приборе «Структурометр СТ-2». Использование порошка мескита в количестве 10% в печенье с сахаром практически не изменило показателей качества за исключением формирования светло-коричневого цвета. Повышение количества порошка мескита до 20% в печенье с сахаром повысило толщину печенья, увеличились значения набухаемости и прочности, а при отсутствии сахара в рецептуре печенье стало менее рассыпчатым с более выраженным коричневым цветом, вкус – сладковатый с тонами какао, его толщина уменьшилась с увеличением значения набухаемости и прочности.

Ключевые слова: порошок мескита, химический состав, безглютеновое печенье, рецептура, показатели качества, колориметрические характеристики

USING MESQUITE POWDER IN THE PRODUCTION OF GLUTEN-FREE COOKIES

© The Author(s) 2023

NILOVA Liudmila Pavlovna, candidate of technical sciences, associate Professor

at the higher school of Service and Trade *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

(194021, Russia, Saint-Petersburg, Polytechnic Street, 29, e-mail: nilova_l_p@mail.ru)

MALYUTENKOVA Svetlana Mikchailovna, candidate of technical sciences, associate Professor

at the higher school of Service and Trade *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

(194021, Russia, Saint-Petersburg, Polytechnic Street, 29, e-mail: e-mail: malutesha66@mail.ru)

Abstract. The article presents the results of studies of the chemical composition of powder (flour) from whole mesquite beans from Peru and its use in the recipe for gluten-free shortbread cookies. Mesquite powder was characterized by a high content of insoluble dietary fiber and sucrose, low protein content and low lipid content. To produce gluten-free shortbread, 10 and 20% gluten-free flour (corn-rice) was replaced in the dough formulation with mesquite powder. This resulted in a change in the intensity of the sweet taste and color from light brown to brown. In cookies, colorimetric characteristics were determined in the *CIE Lab* system using a *Konica Minolta SM-5* spectrophotometer: lightness L^* and color coordinates - a^* and b^* ; geometric dimensions (diameter, thickness), moisture and swelling using standard methods, strength on the ST-2 Structometer. The use of mesquite powder in an amount of 10% in cookies with sugar practically did not change the quality indicators, except for the formation of a light brown color. Increasing the amount of mesquite powder to 20% in cookies with sugar increased the thickness of the cookies, the swelling and strength values increased, and in the absence of sugar in the recipe, the cookies became less crumbly with a more pronounced brown color, the taste was sweetish with cocoa undertones, its thickness decreased with further increase swelling and strength values.

Keywords: mesquite powder, chemical composition, gluten-free cookies, formulation, quality indicators, colorimetric characteristics

Для цитирования: Нилова Л.П. Использование порошка мескита в производстве безглютенового печенья / Л.П. Нилова, С.М. Малютенкова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 12. – № 4(64). – С. 154-159. – EDN: DZJPFJ.

Введение. В сегменте ассортимента мучных кондитерских изделий специализированного назначения наибольшее развитие получила безглютеновая продукция, среди которой печенье находится на первом месте [1]. Для его производства используют муку, не содержащую глютен, из некоторых зерновых (рисовую, кукурузную, овсяную), бобовых (соевую, нутовую, люпиновую) культур, гречневую муку или их комбинации в разных соотношениях [2-4]. Отсутствие глютена в муке, формирующей структуру и объем изделий, приводит к необходимости использования в составе печенья различных стабилизаторов структуры, преимущественно камедей [5-7], или ингредиентов с высоким содержанием пищевых волокон [2].

Печенье, как и другие мучные кондитерские изделия, являются высококалорийными продуктами, преимущественно за счет высокого содержания сахара, количество которого в зависимости от вида печенья может достигать до 20-45% согласно ГОСТ 24901-2014 «Печенье. Общие технические условия». Вместо сахара предлагают использовать мальтит, инулин [8], олигофруктозу, мальтодекстрин [9], стевию в виде порошка или экстракта [10, 11]. Ограничение их использования обусловлено формированием хрупкого, излишне крошливого печенья, а стевии – специфического вкуса.

В последние годы на потребительском рынке России появился порошок мескита, который из-за высокого содержания сахаров могут использовать в качестве заменителя сахара. Порошок мескита или мескитовую муку получают измельчением целых плодов, только створок или семян мескитового дерева *Prosopis spp.* семейства бобовых, включающих 44 вида, произрастающих в основном в засушливых районах Америки [12-15]. Наиболее изучен химический состав бобов или муки из *P. alba* [14, 16-18], *P. juliflora* [15, 18, 19], *P. ruscifolia* [13], *P. pallida* [20, 21]. Мескитовая мука содержит, %, сахаров – до 40, белка – до 15, пищевых волокон – до 25, жиров – около 1 [15, 16, 20]. Химический состав мескитовой муки, в большей степени, зависит из какой части плода (целого плода, семян, мякоти створок) ее получают, чем от вида *Prosopis spp.* В четырех видах мескитовой муки из целых плодов *Prosopis spp.* различия в содержании белков составили 6,49%; сахаров – 4,86%; пищевых волокон – 1,71%; полифенолов – 2,04% [18]. Больше всего белков содержится в мескитовой муке из семян, что может превысить их количество по сравнению с мукой из целых плодов в 5,6 раз, мукой из мякоти створок – в 9,2 раза [16]. В тоже время в муке из целых плодов самое высокое содержание сахаров и пищевых

волокон [18, 20]. Содержание жиров более ровное независимо от вида мескитовой муки [14, 15, 19, 20], но несмотря на незначительное их содержание они содержат олеиновую и линолеовую кислоты и токоферолы α -, γ - и δ -формы [13, 20].

Мескитовую муку рекомендуют использовать в технологии хлебобулочных изделий в количестве 10-15% заменой пшеничной муки высоких сортов (тип 55), что обогащает готовые продукты глобулярными белками, клетчаткой и высокомолекулярными галактоманнанами, повышает их объем, способствуя образованию мелкопористой структуры мякиша [20, 21]. В процессе хранения хлебобулочных изделий с мескитовой мукой в них замедляются процессы черствения и усыхания, чего не происходит в изделиях из более низких сортов пшеничной муки [21, 22]. Увеличение количества мескитовой муки в рецептуре хлебобулочных изделий до 35% снижает высоту хлеба на 41% и повышает твердость на 60% [23].

В безглютеновом хлебе оптимальное количество мескитовой муки составляет 10%, что в меньшей степени уменьшает его объем по сравнению с контролем, чем 5 и 7,5% мескитовой муки, а пористость мякиша остается на уровне контроля [24]. В безглютеновых мучных кондитерских изделиях количество мескитовой муки может быть больше, что было показано на примере разработки маффинов, где 1/3 кукурузной или рисовой муки была заменена на мескитовую муку [25]. В производстве безглютенового печенья мескитовая мука не использовалась, но высокое содержание в ней пищевых волокон позволяет предположить улучшение качественных характеристик печенья.

Методология. Цель работы – изучить химический состав порошка мескита, реализуемого на российском потребительском рынке, и возможность его использования в рецептуре безглютенового печенья.

Порошок мескита торговой марки «Продукты ХХІІ века», ТУ 10.89-017-05604978-2018, был приобретен на маркетплейсе «Wildberries». По информации в маркировке порошок представляет собой молотые бобы мескита, страна происхождения Перу. Вид *Prosopis L.* не указан.

Безглютеновое печенье изготавливали по рецептуре песочного теста [26] из смеси кукурузной и рисовой муки (60/40), сахара, сливочного масла, яйца куриного, соли и разрыхлителя. Для изготовления опытных образцов безглютенового печенья на первом этапе производили замену смеси кукурузной и рисовой муки порошком мескита в количестве 10 и 20% без изменения остального сырья по рецептуре. На втором этапе в безглютеновом печенье с 20% порошка мескита полностью исключили сахар в рецеп-

туре. Для приготовления теста смесь разных видов муки смешивали с предварительно подготовленными остальными ингредиентами по рецептуре. Полученное тесто раскатывали и формовали изделия круглой формы. Все контрольные и опытные изделия выпекали трехкратно в течение 20 минут при температуре +180°C.

В порошке мескита определяли: влажность воздушно-тепловым методом по ГОСТ 9404-88; массовую долю жира экстракционно-весовым методом в аппарате Сокслета по ГОСТ 13496.15-2016; массовую долю белка по Кьельдалю с коэффициентов пересчета общего азота на белок 6,25 по ГОСТ 13496.4-2019; массовую долю пищевых волокон ферментативно-гравиметрическим методом по ГОСТ 34844-2022; массовую долю общего сахара перманганатным методом по ГОСТ 5903-89.

В контрольном и опытных образцах безглютенового печенья определяли органолептические показатели и размер (диаметр, толщина) по ГОСТ 5897-90; массовую долю влаги по ГОСТ 5900-2014; намокаемость по ГОСТ 10114-80; прочность на приборе «Структурометр СТ-2». Для оценки колориметрических характеристик печенья в системе *CIE Lab* использовали спектрофотометр CM-5 KONICA MINOLTA. Оценка цвета проводилась по светлоте L^* (вклад черного или белого цвета в диапазоне от 0 до 100), координатам цвета – a^* (от зеленого [-] до красного цвета [+]) и b^* (от синего [-] до желтого цвета [+]).

Физико-химические исследования проводили в трех кратной повторности печенья каждой выпечки. Для статистической обработки экспериментальных данных использовали *Microsoft Excel 2010*.

Результаты. Порошок мескита, взятый для исследований, был светло-коричневого цвета со сладковатым вкусом с легким оттенком какао. Результаты исследований химического состава порошка мескита представлены в таблице 1. Наибольшая доля приходилась на пищевые волокна – 27,3% или 28,6 г/100 г СВ и сахара – 17,8% или 18,6 г/100 г СВ. В составе пищевых волокон преобладали нерастворимые пищевые волокна, доля которых составляла

88,6%, а в составе сахаров – сахароза с долей 93,8%. Массовая доля белка составила 11,5% или 12,0 г/100 г СВ. Массовая доля жира была самой низкой, составляя 1,1% или 1,15 г/100 г СВ.

Таблица 1 – Химический состав порошка мескита

Показатели	г /100 г
Массовая доля белка	11,5 ± 0,3
Массовая доля жира	1,1 ± 0,1
Массовая доля пищевых волокон,	27,3 ± 0,4
в том числе:	
нерастворимые	24,2 ± 0,2
растворимые	3,1 ± 0,1
Массовая доля общего сахара	17,8 ± 0,4
в том числе сахароза	16,7 ± 0,2
Влажность	4,4 ± 0,2

Количество порошка мескита в рецептуре безглютенового печенья с сахаром оказало разное влияние на его органолептические показатели. При использовании 10% порошка мескита в рецептуре печенья изменений органолептических показателей почти не наблюдалось за исключением цвета, который стал светло-коричневый. Печенье имело характерный сладковатый вкус, правильную форму и ровную поверхность, с равномерной структурой без пустот. Увеличение порошка мескита в рецептуре печенья до 20% придало ему более выраженный сладкий вкус с тонами какао и ярко коричневый цвет с незначительным изменением геометрических размеров. При отсутствии сахара в рецептуре печенья с 20% порошка мескита печенье стало менее рассыпчатым с более выраженным коричневым цветом, а вкус – сладковатым с тонами какао.

Наиболее выраженное влияние порошка мескита в рецептуре безглютенового печенья было связано с изменением цвета. Если в контроле оно имело желтоватый оттенок из-за преобладания в смеси муки кукурузной муки, то в печенье с 10% порошка мескита оно приобрело светло-коричневый цвет, а с 20% порошка мескита – коричневый цвет, что нашло отражение в колориметрических характеристиках печенья (табл. 2).

Таблица 2 – Колориметрические характеристики безглютенового печенья ($p < 0.05$)

Колориметрические характеристики	Безглютеновое печенье			
	контроль	с порошком мескита		
		10%	20%	20% без сахара
$L^*(D65)$	72,12	64,30	56,58	52,70
$a^*(D65)$	-1,05	3,22	4,56	5,88
$b^*(D65)$	16,85	21,90	24,56	23,80

Контрольные образцы безглютенового печенья имели самые высокие значения светлоты L^* , а добавленная мескитовая мука в количестве 10 и 20% снижала значения L^* печенья на 10,9 и 21,5%, соответственно. Отсутствие сахара в рецептуре печенья с 20% мескитовой муки дополнительно снизила значения светлоты L^* на 6,9%. Происходило

изменение координат цвета. Координата a^* смещалась в сторону красного цвета, приобретая положительные значения в печенье с мескитовой мукой. В большей степени изменилась координата b^* , увеличив оттенки желтого на 29,9 и 45,7% в печенье с сахаром и мескитовой мукой в количестве 10 и 20%, соответственно, по сравнению с контрольным

образцом. Отсутствие сахара в печенье с мески-
товой мукой снизило значения координаты b^*
на 3,1% по сравнению с печеньем с сахаром и

мескиковой мукой в том же количестве.

Показатели качества безглютенового печенья
представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Показатели качества безглютенового печенья

Показатели	Безглютеновое печенье			
	контроль	с порошком мескита		
		10%	20%	20% без сахара
Диаметр, мм	62,1 ± 2,0	62,2 ± 2,0	62,8 ± 2,0	62,0 ± 1,0
Толщина, мм	5,0 ± 0,1	5,2 ± 0,2	5,6 ± 0,2	4,8 ± 0,1
Влажность, %	5,80 ± 0,10	5,65 ± 0,10	5,58 ± 0,10	5,56 ± 0,12
Намокаемость, %	156,4 ± 2,1	160,5 ± 2,0	164,8 ± 1,9	164,6 ± 1,1
Прочность, г	962,5 ± 20,2	1021,0 ± 26,3	1072,3 ± 21,5	1086,0 ± 18,0

Все образцы печенья независимо от рецептуры
были одного диаметра, статистически значимых
различий не установлено. Толщина печенья была
различной, увеличиваясь в печенье с 20% порошка
мескита и сахаром в среднем на 6 мм или 12% по
сравнению с контролем, и уменьшаясь на 8 мм или
16,6% при отсутствии сахара в рецептуре.

Порошок мескита независимо от содержания
сахара в рецептуре безглютенового печенья приво-
дил к уменьшению его влажности и увеличению
намокаемости и прочности. При добавлении 10%
порошка мескита изменения этих показателей по
сравнению с контролем были статистически значи-
мы только для значений прочности, которые увели-
чились в среднем на 6,1%.

При добавлении 20% порошка мескита влаж-
ность печенья с сахаром уменьшилась всего на 3,9%
и на 4,3% в печенье без сахара, а набухаемость – на
5,4 и 5,2%, соответственно, но не имела статисти-
чески значимых различий между одними и теми же
показателями. Наиболее выраженные изменения бы-
ли в значениях прочности печенья, которые увели-
чились на 11,4 и 12,8%, соответственно для печенья
с сахаром и без сахара. При одинаковом количестве
порошка мескита 20% более хрупким было печенье
с сахаром, для разлома которого необходимо было
приложить меньшее усилие на 13,7 г, чем для печенья
без сахара.

Обсуждение. Порошок мескита, реализуемый
в России, имел характерный для мескиковой муки
из целых бобов химический состав с незначи-
тельными отклонениями, связанными с видами *Prosopis*
spp. и регионом произрастания [14, 15, 18-20]. Мука
из бобов мескикового дерева в зависимости от вида
Prosopis spp. содержит белков, %: 9,12 (*P. juliflora*)
[19]; 9,5 (*P. pallida*) [20]; 11,01 (*P. alba*), 11,33 (*P. nigra*)
[18].

Различия в содержании углеводов более суще-
ственны, хотя в их составе преобладают сахара
и пищевые волокна. По данным разных авторов
[18,19] мескиковая мука из бобов мескикового де-
рева одного вида *P. juliflora*, произрастающего в
Бразилии, почти не отличается содержанием белков
9,12% [19] и 8,84% [18], но содержание пищевых
волокон отличается более чем в 2 раза, и состав-
ляет 15,1 и 38,45%, соответственно. Но, несмотря

на значительные различия в общем содержании
пищевых волокон, в них преобладают нераство-
римые пищевые волокна – от 86% (*P. juliflora*) до
92,7% (*P. nigra*) [18, 20]. На долю сахаров может
приходиться от 18,3% (*P. pallida*) [20] до 57,37% (*P.*
juliflora) [18], большинство из которых составляет
сахароза – 91,5-95,6%.

Мескиковая мука из целых бобов содержит мало
жиров – от 1,0% (*P. pallida*) [20] до 1,28% (*P. juliflora*)
[19]. Вне зависимости от способа получения муки
и степени ее измельчения, содержание жира в ней
практически не изменяется, находясь в пределах 1,13-
1,69%, что показано на примере муки из *P. alba* [14].

При замесе теста с добавлением порошка мески-
та происходило усиление его коричневого оттенка,
что может быть связано с окислением полифенолов
полифенолоксидазами [23]. Полифенолы содержатся
во всех частях мескиковых бобов с преобладанием
в семенах. В мескиковой муке из целых бобов
полифенолов содержится на 15% меньше, чем в
муке из семян [16]. Большее влияние на содержание
полифенолов оказывает вид *Prosopis spp.* и условия
сушки. По данным de Melo Cavalcante [15] в
мескиковой муке из семян *P. juliflora*, высушенной
при 60°C содержится 172,4 мг/100 г. При использова-
нии сублимационной сушки муки из семян *P. alba*,
P. nigra, *P. ruscifolia* в них содержатся от 512 до 883
мг/100г полифенолов [27].

Выпечка формованных изделий привела к
более выраженному коричневому оттенку печенья
с порошком мескита, формирующемуся за счет
дальнейшего окисления полифенолов и образо-
вания продуктов меланоидинообразования [23, 28,
29]. Снизились значения светлоты L^* и увеличились
значения координат цвета a^* и b^* . Аналогичные
результаты влияния количества мескиковой муки
на колориметрические характеристики были по-
лучены рядом авторов при выпечке хлеба [22,
23], безглютенового хлеба [24] и маффинов [25].
При увеличении количества мескиковой муки в
рецептуре безглютенового хлеба с 5 до 10% значения
светлоты L^* снизились с 67,3 до 57,9, координат a^*
и b^* увеличились с 3,12 до 5,57 и от 23,5 до 26,2,
соответственно [24]. При использовании мескиковой
муки в больших количествах (15; 25 и 35%) в
рецептуре пшеничного хлеба, значения светлоты L^*

мякиша снизились с 59,04 до 55,34, а координаты a^* и b^* увеличились с 2,57 до 5,26 и 12,16 до 14,01, соответственно. В отличие от мякиша в корке изменения координат a^* и b^* смещались в сторону низких значений [22].

Печенье с мескитовой мукой изменяло свои геометрические размеры при использовании ее в рецептуре в количестве 20%. Увеличение высоты печенья с мескитовой мукой и сахаром могло быть связано со свойством сахара разжижать тесто, способствуя большому расслаблению его структуры, а также повышать температуру клейстеризации крахмала и денатурации белков при выпечке [24]. Отсутствие сахара в рецептуре печенья изменило вязкость системы. В таких условиях при выпечке более интенсивно происходит полимеризации белков посредством реакции дисульфид-сульфгидрильного обмена, что увеличивает прочность структуры теста [15]. Многие авторы [24, 30] связывают уменьшение объема безглютенового хлеба с присутствием в мескитовой муке гидроколлоидов с более высокой молекулярной массой, которые повышают водоудерживающую способность. Высокое содержание нерастворимых пищевых волокон в мескитовой муке снижает эмульгирующую способность теста [15], что может быть одной из причин уменьшения высоты печенья с мескитовой мукой и сахаром. Но, с другой стороны, за счет увеличения водопоглотительной способности теста, повышаются набухаемость и прочность печенья.

Выводы. Порошок мескита, реализуемый в России под торговой маркой «Продукты ХХII века», полученный из целых бобов по информации в маркировке, содержит преимущественно углеводы, среди которых преобладают нерастворимые пищевые волокна и сахароза, невысокое содержание белков и низкое содержание жиров.

Использование порошка мескита в количестве 10 и 20% в рецептуре безглютенового печенья из песочного теста позволяет получить качественные изделия от светло-коричневого до коричневого цвета с разной выраженностью сладости вкуса. Порошок мескита в количестве 20% в рецептуре печенья усиливает сладкий вкус с характерными тонами какао, увеличивает толщину и повышает значения набухаемости и прочности. Отсутствие сахара в рецептуре безглютенового печенья с порошком мескита 20% изменяет его органолептические показатели: темно-коричневый цвет, слабовыраженный сладкий вкус, а также происходит его уплотнение, характеризующееся уменьшением толщины и увеличением значений прочности.

Высокое содержание сахарозы в порошке мескита позволяет предположить использование меньшего количества сахара в рецептуре безглютенового печенья из песочного теста по сравнению с традиционной рецептурой для обеспечения его оптимальной сладости и тонов какао, на что должны быть направлены дальнейшие исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Ивашенко Я.С., Осипова Е.Р., Орлова О.Ю., Бойцова Ю.С. Анализ тенденций рынка и изучение спроса на функциональную безглютеновую продукцию // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Экономика и экологический менеджмент. 2022. № 3. С. 89-96.
2. Рензязева Т.В., Багирова М.Е. Печенье из рисовой муки для специализированного питания // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2017. № 1. С. 49-55.
3. Paesani C., Bravo-Núñez A., Gómez M. Effect of extrusion of whole-grain maize flour on the characteristics of gluten-free cookies // LWT - Food Science and Technology. 2020. № 132. 109931.
4. Xu J., Zhang Y., Wang W., Li Y. Advanced properties of gluten-free cookies, cakes, and crackers: A review // Trends in Food Science & Technology. 2020. № 103. P. 200–213.
5. Kaur M., Sandhu K. S., Arora A. P., Sharma A. Gluten free biscuits prepared from buckwheat flour by incorporation of various gums: Physicochemical and sensory properties // LWT-Food Science and Technology. 2015. № 62 (1). P. 628–632.
6. Hamdani A.M., Wani I.A., Bhat N.A. Gluten free cookies from rice-chickpea composite flour using exudate gums from acaia, apricot and karaya // Food Bioscience. 2020. № 35. 100541.
7. Gharraie Z., Hossein Azizi M., Barzegar M., Gavlighi H.A. Gum tragacanth oil/gels as an alternative to shortening in cookies: Rheological, chemical and textural properties // LWT - Food Science and Technology. 2019. № 105. P. 265–271.
8. Стрелкова А.К., Красина И.Б., Филиппова Е.В., Лысенко А.В. Влияние сахарозаменителей и пищевых волокон на текстурные свойства безглютенового теста и печенья // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2021. № 2-3. С. 45-49.
9. Rakmai Ja., Haruthaithanasan V., Chompreeda P., Chatakanonda P., Yonkoksung U. Development of gluten-free and low glycemic index rice pancake: Impact of dietary fiber and low-calorie sweeteners on texture profile, sensory properties, and glycemic index // Food Hydrocolloids for Health. 2021. №1. 100034.
10. Нилова Л.П., Малютенкова С.М., Шмакова Л.Н. Влияние порошка стевии на качество безглютенового печенья // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2022. Т. 84. № 4. С. 124-132.
11. Salazar V.A.G., Encalada S.V., Cruz A.C., Campos M.R.S. Stevia rebaudiana: A sweetener and potential bioactive ingredient in the development of functional cookies // Journal of Functional Foods. 2018. № 44. P. 183–190.
12. Ewens M., Felker P. A comparison of pod production and insect ratings of 12 elite *Prosopis alba* clones in a 5-years semi-arid Argentine field trial // Forest Ecology and Management 2010. № 260. P. 378–383.
13. Freyre M., Astrada E., Blasco C., Baigorria C., Rozycki V., Bernardi C. Valores nutricionales de frutos de Vinal (*Prosopis ruscifolia*): Consumo humano y animal // Cienc. Tecnol. Aliment. 2003. 4 (1), P. 41-46.
14. Rodriguez I. F., Pérez M. Jo., Cattaneo F., Zampini I. C., Cuello A. S., Mercado M. I., G. Ponessa, Isla M. I. Morphological, histological, chemical and functional characterization of *Prosopis alba* flours of different particle sizes // Food Chemistry. 2019. № 274. P. 583–591.
15. de Melo Cavalcante A. M., de Melo A. M., da Silva A. V. F., da Silva Neto G. Jo., Barbi R. C. T., Ikeda M., Silva G. B., Steel C. Jo., da Silva O. S. Mesquite (*Prosopis juliflora*) grain flour: New ingredient with bioactive, nutritional and physical-chemical properties for food applications // Future Foods. 2022. № 5. 100114.
16. Sciammaro L., Ferrero C., Puppo M. C. Chemical and nutritional properties of different fractions of *Prosopis alba* pods and seeds // Food Measure. 2016. № 10. P.103–112.
17. Cattaneo F., Costamagna M.S., Zampini I.C., Sayago J., Alberto M.R., Chamorro V., Pazos A., Thomas-Valdés S., Schmeda-Hirschmann G., Isla M.I. Flour from *Prosopis alba* cotyledons: A natural source of nutrient and bioactive phytochemicals // Food Chemistry. 2016. №208. P. 89-96.
18. Galán A. G., Corrêa A. D., de Abreu C. m. P., Barcelos M. de F. P. Caracterización química de la harina del fruto de *Prosopis* spp. procedente de Bolivia y Brasil // Archivos Latinoamericanos de Nutrición. 2008. № 58 (3). P.309-315.

19. Gusmão R. P., Cavalcanti-Mata M. E. R. M., Duarte M. E. M., Gusmão T. A. S. Particle size, morphological, rheological, physico-chemical characterization and designation of minerals in mesquite flour (*Prosopis juliflora*) // *Journal of Cereal Science*. 2016. № 69. 119-124.
20. Gonzales-Barron U., Dijkshoorn R., Maloncy M., Finimundy T., Calhelha R. C., Pereira C., Stojković D., Soković M., Ferreira I. C. F. R., Barros L., Cadavez V. Nutritive and bioactive properties of mesquite (*Prosopis pallida*) flour and its technological performance in breadmaking // *Foods*. 2020. V. 9. № 597. P. 1-25.
21. Gonzales-Barron U., Dijkshoorn R., Maloncy M., Finimundy T., Carochi M., Ferreira I. C. F. R., Barros L., Cadavez V. Nutritional quality and staling of wheat bread partially replaced with Peruvian mesquite (*Prosopis pallida*) flour // *Food Research International*. 2020. № 137. 109621.
22. Bigne F., Puppo M. C., Ferrero C. Fibre enrichment of wheat flour with mesquite (*Prosopis* spp.): Effect on breadmaking performance and staling // *LWT - Food Science and Technology*. 2016. № 65. P. 1008-1016.
23. Bigne F., Puppo M. C., Ferrero C. Mesquite (*Prosopis alba*) flour as a novel ingredient for obtaining a “panettone-like” bread. Applicability of part-baking technology // *LWT - Food Science and Technology*. 2018. № 89. P. 666-673.
24. Korus Ja., Witczak M., Korus A., Juszcak L. Mesquite (*Prosopis L.*) as a functional ingredient in gluten-free dough and bread // *LWT - Food Science and Technology*. 2022. № 168. 113957.
25. Sciammaro L., Ferrero C., Puppo M. C. Gluten-free baked muffins developed with *Prosopis alba* flour // *LWT - Food Science and Technology*. 2018. №98. P. 568-576.
26. Сборник рецептур мучных кондитерских и булочных изделий для предприятий общественного питания: справочник. – СПб: Троицкий мост. – 2017. – 194 с.
27. Picariello G., Sciammaro L., Siano F., Volpe M. G., Puppo M. C., Mamone G. Comparative analysis of C-glycosidic flavonoids from *Prosopis* spp. And *Ceratonia siliqua* seed germ flour // *Food Research International*. 2017. № 99. P. 730-738.
28. Нилова Л.П., Пилипенко Т.В. Меланоидины пищевых систем: фракционирование и оценка антиоксидантных свойств // *Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов*. 2018. № 6. С. 3-8.
29. Wang He-Ya., Qian He, Yao W.R. Melanoidins produced by the Maillard reaction: structure and biological activity // *Food Chemistry*. 2011. № 128. P. 573-584.
30. Culetu A., Duta D. E., Papageorgiou M., Varzakas T. The role of hydrocolloids in gluten-free bread and pasta; rheology, characteristics, staling and glycemic index // *Foods*. 2021. № 10(12). 3121.

Статья поступила в редакцию 14.11.2023

Статья принята к публикации 15.12.2023

УДК 637.1

EDN: ENXKPE

РАЗРАБОТКА ОБОГАЩЁННОГО ЙОГУРТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСТИТЕЛЬНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТОВ

© Автор 2023

SPIN-код: 2216-2919

AuthorID: 504113

ORCID: 0000-0003-2481-6656

ПОГОСЯН Давид Гарегинович, доктор биологических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Переработка сельскохозяйственной продукции»

Пензенский государственный аграрный университет

(440014, Россия, Пенза, ул. Ботаническая д. 30, e-mail: pogosyan.d.g@mail.ru)

Аннотация. Выполненная работа посвящена разработке обогащенного йогурта на основе растительных компонентов, обладающих функциональными свойствами. С целью повышения биологической ценности йогурта разработана рецептура обогащённого напитка с добавлением функциональных компонентов: шиповника богатого природными антиоксидантами, витаминами и цикория как источника пищевых волокон – инулина. Включение в рецептуру йогурта сублимированного порошка шиповника и цикория в количестве 1,5 и 1% от массы нормализованного молока, в сочетании с ягодным наполнителем и сахаром, что позволяет создать новый напиток с сохранением органолептических показателей. Функциональные компоненты вводятся в процессе заквашивания при производстве йогурта термостатным способом с сокращением продолжительности традиционного периода сквашивания на 30 минут. В результате проведенных лабораторных исследований было установлено, что разработанный йогурт имеет достаточно высокие органолептические показатели, и по титруемой кислотности соответствуют предъявляемым требованиям.

Ключевые слова: йогурт, шиповник, цикорий, инулин, кислотность, органолептические показатели, функциональный компонент.

DEVELOPMENT OF ENRICHED YOGURT USING PLANT FUNCTIONAL COMPONENTS

The Author(s) 2023

POGHOSYAN David Gareginovich, doctor of biological sciences, professor,
head of the department "Processing of agricultural products"

Penza State Agrarian University

(Penza, Botany str., 30, 440014, Russia, e-mail: pogosyan.d.g@mail.ru)

Abstract. The work performed is devoted to the development of enriched yogurt based on plant components with functional properties. In order to increase the biological value of yogurt, a recipe for an enriched drink with the addition of functional components has been developed: rosehip rich in natural antioxidants, vitamins and chicory as a source of dietary fiber – inulin. The inclusion of freeze-dried rosehip and chicory powder in the yogurt recipe in the amount of 1.5 and 1% of the normalized milk weight, combined with berry filler and sugar, which allows you to create a new drink with the preservation of organoleptic parameters. Functional components are introduced during the fermentation process in the production of yogurt by a thermostatic method with a reduction in the duration of the traditional fermentation period by 30 minutes. As a result of laboratory studies, it was found that the developed yogurt has sufficiently high organoleptic characteristics, and the titrated acidity meets the requirements.

Keywords: yogurt, rosehip, chicory, inulin, acidity, organoleptic parameters, functional component.

Для цитирования: Погосян Д.Г. Разработка обогащённого йогурта с использованием растительных функциональных компонентов / Д.Г. Погосян // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 12. – № 4(64). – С. 160-165. – EDN: ENXKPE.

Введение. В настоящее время одним из приоритетных направлений государственной политики в области здорового питания России является развитие производства пищевых продуктов, обогащенных незаменимыми компонентами; продуктов функционального назначения, диетических (лечебных и профилактических) пищевых продуктов [1]. Среди огромного изобилия продуктов питания преобладающая часть функциональных (обогащенных) продуктов приходится на долю кисломолочных напитков, среди которых большой популярностью во всех странах пользуется йогурт [2].

Йогурт, или другие молочные продукты считаются обогащенными если в них добавлены пищевые и (или) биологически активные вещества и (или) пробиотические микроорганизмы, которые в нем изначально не содержались, или находились в незначительном количестве или были разрушены или инактивированы в процессе производства; при этом содержание обогащаемого компонента должно быть, доведено в 100 мл или 100 г продукта, или одноразовой порции продукта не менее 5% и не более верхних безопасных уровней потребления таких веществ от уровня его суточного потребления. Существуют

так же понятия функциональный йогурт, что в принципе означает обогащённый функциональным компонентом продукт [3,4].

Регулярное употребление йогурта, обогащённого пробиотиками, позволяет укрепить иммунитет в целом и снизить частоту инфекционно-воспалительных заболеваний. Также важно отметить, что пробиотические бактерии, имеющиеся в йогурте, повышают популяцию полезных микроорганизмов в кишечнике, в результате угнетается рост патогенной и условно-патогенной флоры, что улучшает обмен веществ в организме. Применение обогащенных йогуртов в питании детей способствует нормализации кишечной микрофлоры после использования антибиотиков, а также способствует повышению иммунитета за счет стимуляции синтеза в крови лизоцима и иммуноглобулина А [5]. Кроме того, йогурт может рассматриваться, как альтернатива медикаментозной терапии на ранних стадиях формирования гипертонической болезни [6]. По данным канадских учёных, йогурт повышает циркуляцию в крови особых аноректических гормонов. Данные вещества угнетают чувство голода. В результате человек потребляет меньше пищи, а его вес постепенно снижается. Следовательно, йогурт также он способствует похудению, что рекомендуется для людей с повышенной массой тела [7].

Для получения обогащенных йогуртов, активно применяются различные растительными компоненты, которые богаты функциональными инцидентами, в частности пищевыми волокнами, пектинами, микрокристаллической целлюлозой, природными антиоксидантами, витаминами и минералами [8].

Одним из таких примеров является шиповник, псевдоплод растения, принадлежащего к роду «*Rosa*», который ранее считался отходами садоводства без какого-либо биологического применения. Его плоды богаты природными антиоксидантами, витамином С, полифенолами, каротиноидами, токоферолами и полисахаридами. Они обладают противомикробной и остеопротекторной активностью [9]. При употреблении 100 г йогурта, обогащенного сиропом шиповника потребность в витамине С может удовлетворяться на 36% и более, а витаминах группы В, на 59% и более, что, повышает прочность и эластичность кровеносных сосудов, обладает антивирусными и антимикробными свойствами, способствует уменьшению отрицательного последствия лучевых поражений и выведению из организма вредных канцерогенных веществ [10]. В технологии новых обогащенных йогуртов используются так же плоды дальневосточных шиповников даурского («*Rosa davurica*») и морщинистого («*Rosa rugosa*») из которых готовят водные экстракты, затем мезгу из отжима и далее сироп [11]. Несмотря на весомую пользу шиповника на состояние здоровья человека, этот продукт не активно используется при выработке молочных продуктов. В настоящее время отечественная промышленность вырабатывает всего

лишь четыре разновидности молочных продуктов в виде только йогуртов с добавлением шиповника: йогурт «*Parmalat Comfort*» безлактозный клубника-шиповник с массовой долей жира (м.д.ж.) 3%; биоийогурт «*Тёма*» шиповник-малина (с витаминами) с м.д.ж. 2,8%; йогурт «*Лосево*» с м.д.ж. 2,5%; йогурт «*Фермерский*» с шиповником и витамином с м.д.ж.1,5%.

В качестве пребиотиков в молочной промышленности хорошо себя зарекомендовал инулин, который представляет собой природный полисахарид со сладковатым вкусом, не имеющий синтетических аналогов. При поступлении его в организм, улучшается перистальтика кишечника, стимулируется пищеварение, что обеспечивает питание и рост лакто и бифидобактерий. По своей структуре инулин похож на клетчатку, не переваривается в желудке и кишечнике, тем самым создает иллюзию сытости и способствует похудению. Инулин позволяет снизить содержание сахара в крови, выводит из организма холестерин, радионуклеиды и токсины. Большое количество инулина содержится в цикории, который используется в качестве заменителя кофе. Порошок цикория получают путем измельчения высушенного обжаренного корня этого растения. Корень этого растения содержит множество полезных нутриентов, а содержание ценного полисахарида инулина достигает до 60-70 % в сухом веществе [4,12-14]. Разработан патент, где в качестве пищевых добавок используют порошок корнеплодов столовой свеклы в количестве 4-5%, полученной сублимационной сушкой, и порошок корней цикория в количестве 1-2% [15]. Известная во всем мире компания производящая функциональные ингредиенты «*BENEО*» предлагает для производства фруктовых йогуртов с пониженным содержанием сахара – фруктовые начинки с пребиотическими волокнами «*Orafti® Инулин*» или «*Олигофруктоза*» [16]. Существуют так же заквасочные культуры с добавлением инулина под маркой «*Заквасович*». Ценовая категория данных препаратов в последнее время существенно повысилась, что сказывается на цене реализации функциональных продуктов. Отечественная промышленность выпускает йогурты с инулином торговых марок «*ФрутоНяня*», «*БИОМАХ*», «*Normula*» и «*БиоБаланс*». Тем не менее, ассортимент йогурта с добавлением шиповника и инулина учитывая их важность в питании людей, не является столь весомым и расширение его разновидностей за счет поиска и применения доступных, функциональных производных, считаются в молочной промышленности актуальными вопросами.

Методология. Целью исследования явилось разработка функционального йогурта с добавлением сублимированного шиповника и цикория. Лабораторные выработки йогуртов проводились в условиях кафедры переработки с/х продукции Пензенского ГАУ. Для приготовления лабораторных образцов были использованы следующие

ингредиенты: молоко ультрапастеризованное, сублимированный шиповник, порошок цикория, ягодный наполнитель, сухое обезжиренное молоко, сахар-песок, закваска для йогурта.

Перед выработкой был проведен анализ молока-сырья. В качестве основного сырья для лабораторной выработки йогурта использовали ультрапастеризованное молоко с м.д.ж. 3,2% торговой марки «Русское молоко», производимое в АО «Молочный комбинат «Пензенский». Анализ химического состава и свойств молока проводили на экспресс-анализаторе «Эксперт Профи», кислотность титрометрическим методом. Массовую долю жира в йогурте определяли кислотным методом. Органолептическую оценку проводили по 9-ти бальной шкале [17].

В процессе исследования проводились две лабораторные выработки. Первая лабораторная выработка была пробной, её целью являлось установление оптимальных норм ввода таких ингредиентов как цикорий и шиповник, без ухудшения органолептические показатели готового продукта. Первая лабораторная выработка включала выработку 4-х образцов: 1-й – йогурта с добавлением шиповником; 2-й – йогурта с цикорием; 3-й – йогурта с шиповником и цикорием; 4-й – без компонентов (контрольный).

Целью проведения второй лабораторной выработки явилось устранение недостатков, выявленных в процессе проведения первого лабораторного опыта и тем самым отработка параметров и

дозировок вносимых компонентов при выработке обогащенного йогурта. Для лабораторной выработки №2 было использовано молоко с такими же физико-химическими показателями. Лабораторная выработка состояла из 5 образцов: 1-й – йогурт с шиповником и сахаром; 2-й – йогурт с цикорием и сахаром; 3-й – йогурт с шиповником, цикорием и сахаром; 4-й – йогурт с шиповником, цикорием, сахаром и фруктовым наполнителем «Лесные ягоды»; 5-й – без компонентов с сахаром (контрольный).

Результаты. Согласно схеме лабораторной выработки йогурта термостатным способом, в молоко с температурой 40-42°C вносили бактериальный концентрат и заквашенное молоко разливали в стерильные баночки объёмом 200 мл. затем согласно рецептуре, представленной в таблице 1, в каждую банку добавляли соответствующие компоненты (сухое молоко, гранулы сублимированного шиповника, порошок цикория).

Количество вносимого в смесь сухого обезжиренного молока определяли расчетным путем исходя из содержания белка в сухом молоке, молоко-сырье и нормы содержания белка в готовом продукте, так же с учетом того, что в йогурте без наполнителя содержание белка должно быть не менее 3,2%, а с компонентами не менее 2,8%. Дозировки цикория и шиповника были определены на основании рекомендаций на упаковке производителя, 1-2 чайные ложки (2-4 г) на 150 мл воды. Оба ингредиента произведены компанией ООО «Кофейная компания «Вокруг света».

Таблица 1 – Рецептура йогурта лабораторной выработки №1

Образец	Молоко	Молоко сухое обезжиренное	Сублимированный шиповник	Порошок цикория
		содержание, %		
1	95	3	2	-
2	95	3	-	2
3	90	6	2	2
4 (контрольный)	97	3	-	-

Для проведения процесса сквашивания, заквашенные образцы молока помещали в термостат и выдерживали при температуре 40-42°C в течение 4 часов. По окончании процесса сквашивания йогурт поместили в холодильник для охлаждения до температуры 4±2°C. После этого проводили органолептическую оценку готового продукта и определяли титруемую кислотность (табл. 2). При органолептической оценке было установлено, что у всех образцов консистенция однородная, достаточно плотная и оценивалась максимально в 2 балла. Цвет йогурта был обусловлен цветом добавленных компонентов: с шиповником – бледно-розового цвета, а с цикорием – коричневого, шоколадного цвета и оценивался у всех образцов в 1 балл. Запах был приятный и оценивался у всех образцов в 2 балла. Вкус и запах для всех кисломолочных продуктов должен быть чистым кисломолочным, без посторонних привкусов и запахов, что было

характерно для контрольного образца №4. Однако по вкусу были выявлены существенные отклонения. Так вкус у образца №1 был с выраженным специфическим вкусом шиповника. Вкус у образцов №2 и 3 с добавлением цикория оказался вовсе горьковатым. Показатели титруемой кислотности в конце сквашивания были в пределах нормы. Однако следует отметить, использование шиповника и особенно цикория приводило к большему нарастанию кислотности готового продукта при одинаковой продолжительности сквашивания в сравнении с контрольным образцом №4. При этом титруемая кислотность в образцах №1,3 и 2 оказалась выше контроля на 8,2; 12,9 и 17,6%. Следовательно, добавляемые компоненты оказывали стимулирующее воздействие на рост и развитие молочнокислых микроорганизмов, что требует сокращения продолжительности сквашивания по мере достижения кислотности на уровне 85°Т.

Таблица 2 – Показатели кислотности лабораторной выработки №1

Образец	Наполнитель	Титруемая кислотность, °Т	м.д.ж., %	Органолептическая оценка, балл
1	Шиповник	92	3,05	7,2
2	Цикорий	100	3,0	6,0
3	Шиповник, цикорий	96	2,95	6,7
4 (контрольный)	Без наполнителей	85	3,10	8,4

С целью устранения нежелательного горького привкуса, в особенности в образце с добавлением цикория, выявленного по результатам первой лабораторной выработки, было принято решение уменьшить количество вносимого шиповника с 2 до 1,5 %, а цикория в два раза с 2 до 1% и включения дополнительно в рецептуру сахара и фруктового наполнителя «Лесные ягоды» (табл. 3). С целью снижения кислотности в образцах с добавлением компонентов уменьшали продолжительность сквашивания на 30 минут.

Изменения в рецептуре за счет снижения функ-

циональных ингредиентов, добавления сахара и ягодного наполнителя позволили устранить нежелательные привкусы в йогурте. По результатам органолептической оценки самые высокие баллы получил йогурт с шиповником, цикорием и фруктовым наполнителем, который практически сравнялся с классическим йогуртом без наполнителей (табл. 4). Всех ниже был оценён образец с цикорием, однако при добавлении шиповника вкус цикория несколько смягчался. Сокращение продолжительности сквашивания позволили снизить показатели титруемой кислотности во всех образцах йогуртов.

Таблица 3 – Рецептура йогурта лабораторной выработки №2

Образец	Молоко	Молоко сухое обезжиренное	Сахар	Сублимированный шиповник	Порошок цикория	Ягодный наполнитель
		содержание, %				
1	88,5	5	5	1,5	-	-
2	89	5	5	-	1	-
3	87,5	5	5	1,5	1	-
4	83,5	7	2	1,5	1	5
5 (контрольный)	90	5	5	-	-	-

Таблица 4 – Показатели качества йогурта

Образец	Наполнитель	Титруемая кислотность, °Т	м.д.ж., %	Органолептическая оценка, балл
1	Шиповник	90	2,85	8,2
2	Цикорий	91	2,80	6,7
3	Шиповник, цикорий	93	2,75	7,5
4	Шиповник, цикорий, ягодный наполнитель	94	2,70	8,5
5	Без наполнителей	88	2,90	8,6

Обсуждение. Научная новизна нашей разработки заключается в том, что в отличие от других изученных и применяемых разновидностей шиповника, вместо распространенных сиропов [10,11, 18,19] нами была изучена возможность использования сублимированного экстракта шиповника в комбинации с порошком цикория. Экстракт шиповника представляет собой натуральное порошкообразное средство, полученное из плодов данного растения (производитель ООО «Кофейная компания «Вокруг света»). При сублимации ягоды обезвоживаются вакуумным способом, сохраняя свою форму, естественный цвет, вкус и аромат, а также витамины и микроэлементы в большей степени, чем при экстракции, отжиме, получении сиропов. По внешнему виду порошок шиповника представляет собой мелкие гранулы, которые хорошо растворимы в воде и имеют специфический запах и вкус характерный для свежего шиповника. Продукт является достаточно калорийный – 280 ккал / 1200 кДж на

100 г. В наших исследованиях был использован порошок шиповника, который предназначен для приготовления шиповникового чая. Пищевая ценность 100 г порошка шиповника была следующая: белки – 4,0 г; жиры – 0,2 г; углеводы – 66,0 г; пищевые волокна – 8 г; бета-каротин – 2,6 мг; витамин С – 650 мг; марганец – 950 мг. Из всех компонентов необходимо отметить, что изучаемый порошок шиповника является прежде всего кладью марганца и витамина С в результате которого, употребление 10,5 и 13,8 г порошка удовлетворяет суточную потребность взрослого человека в данных биологически активных веществах. Роль микроэлемента марганца трудно не до оценить по причине того, что он принимает активное участие в кроветворении, развитии скелета, на работу иммунной системы и мозга. Недостаток марганца в детском питании приводит к нарушению формирования скелета и замедлению развития и роста, к ослаблению иммунитета и развитию аллергии. В свою очередь

витамин С главный иммуномодулятор человеческого организма, который стимулирует защитные силы организма, укрепляет иммунную систему, так же поддерживает в нормальном состоянии кровеносные сосуды, кожу, костную ткань, улучшает усвоение железа.

Исследуемый порошок шиповника частично богат пищевыми волокнами и бета-каротином и содержит природные минеральные вещества (калий, натрий, кальций, фосфор, магний, железо), витаминами (С, Е, В1, В2, РР, бета-каротин), пектиновыми веществами, антиоксидантами.

В качестве источника инулина использовали порошок цикория «Здоровье» натуральный растворимый, произведенный так же в ООО «Кофейная компания «Вокруг света». Согласно протоколу испытаний проведенной «Союзэкспертиза» по заказу «Росконтроль РФ» порошок произведенный данной компанией содержит инулина в количестве 54,4% от массы сухого вещества. Для положительного эффекта взрослому человеку необходимо получать от 2,5 до 8 г инулина в сутки. Согласно рациональным нормам потребления пищевых продуктов, отвечающих современным требованиям здорового питания рекомендуемая норма потребления кисломолочных напитков, составляет порядка 300 г в сутки (в перерасчете на суммарное потребление молока, йогурта, кефира с м.д.ж. от 0,5 до 3,2%) [4].

Включение в рецептуру йогурта сублимированного шиповника в количестве 2% от массы продукта, а также 2% порошка цикория как в отдельности, так и в смеси приводило к ухудшению вкуса за счет появления неприятного специфического привкуса и горечи. Снижение содержания в рецептуре йогурта шиповника с 2 до 1,5% и цикория с 2 до 1% и с дополнительным вводом ягодного наполнителя в количестве 5% в сочетании с сахаром (2%) позволили улучшить вкусовые качества обогащенного йогурта.

Расчеты показывают, что внесение в йогурт 1,5% сублимированного порошка шиповника, позволит обогатить 100 г продукта витамином С и марганцем на 10,9 и 14,3 мг. При суточном употреблении 300 мл йогурта в организм человека поступит витамином С и марганца соответственно 32,7 и 42,9% от рекомендуемой суточной нормы поступления.

Внесение в йогурт 1% цикория «Здоровье», позволит обогатить 100 г продукта 0,54 г инулина. Расчеты показывают, что при суточном употреблении 300 мл йогурта в организм человека поступит соответственно от 1,62 г инулина, что составляет от 20 до 65% от рекомендуемой суточной нормы его потребления.

Выводы. С целью повышения биологической ценности йогурта разработана рецептура обогащенного напитка с добавлением функциональных компонентов: шиповника богатого природными антиоксидантами, витаминами и цикория как источника пищевых волокон – инулина. Включение

в рецептуру йогурта сублимированного порошка шиповника и цикория в количестве 1,5 и 1% от массы нормализованного молока, в сочетании с ягодным наполнителем и сахаром, что позволяет создать новый напиток с сохранением органолептических показателей. Функциональные компоненты вводятся в процессе заквашивания при производстве йогурта термостатным способом с сокращением продолжительности традиционного периода сквашивания на 30 минут. В результате проведенных лабораторных исследований было установлено, что разработанный йогурт имеет достаточно высокие органолептические показатели, и по титруемой кислотности соответствуют предъявляемым требованиям [20].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Законодательное обеспечение государственной политики в области производства функциональных и специализированных пищевых продуктов питания в Российской Федерации. Совет Федерации Федерального собрания РФ. 25 января 2018. <http://council.gov.ru/activity/activities/roundtables/88318/>
2. Погосян, Д.Г. Обзор функциональных продуктов на региональном молочном рынке / Д.Г. Погосян // Молочная река. – 2020. – № 4(80). – С. 14-16. – EDN IXBTQF.
3. Третьяк, Л.Н. Новый подход к обогащению кисломолочных продуктов регионально значимыми биоэлементами и витаминами / Л.Н. Третьяк, А.О. Мордвина // Фундаментальные исследования – 2017. – № 3. – С. 77-84.
4. Погосян, Д.Г. Новый взгляд на обогащенный йогурт / Д.Г. Погосян, И.В. Гаврюшина // Молочная река. – 2022. – № 2(86). – С. 28-30.
5. Комарова, О.Н. Влияние функциональных ингредиентов продуктов детского питания на иммунитет / О.Н. Комарова, А.И. Хавкин // Медицинский совет. 2019;(17):37-44. doi: 10.21518/2079-701X-2019-17-37-44.
6. Польза йогурта при гипертонии: выводы американских ученых. <https://stomclinik5.ru/blog/polza-jogurta-pri-gipertonii-otkrytija> (дата обращения: 04.11.2023).
7. Dougkas A., et al. Differential effects of dairy snacks on appetite, but not overall energy intake. *British Journal of Nutrition*. – 2012. – Т. 108. – №. 12. – С. 2274-2285.
8. Крючкова, В.В. Перспективы развития функциональных продуктов питания / В.В. Крючкова // Молочная промышленность. 2011. – № 8. – С. 36-37.
9. Meichun Z., Yanlin S., Le L., Huitang P. Road to a bite of rosehip: A comprehensive review of bioactive compounds, biological activities, and industrial applications of fruits - April 2023. *Trends in Food Science & Technology* 136(10) DOI: 10.1016/j.tifs.2023.04.006 URL
10. Курнакова, О.Л. Разработка и оценка потребительских свойств обогащенных йогуртов с использованием растительных ингредиентов: автореферат дис. ... кандидата технических наук / О.Л. Курнакова. - Орел. 2015. – 23 с.
11. Палагина, М.В. Использование дальневосточных шиповников в технологии питьевых йогуртов / М.В. Палагина, Е.С. Фищенко, Е.С. Козырева, Текутьева, В.В. Пономарев // Пищевая промышленность, 2018. №6. – С. 50-52.
12. Сербасова, Э.Р. Инулин: природные источники, особенности метаболизма в растениях и практическое применение / Э.Р. Сербасова, А.Б. Якупова, Ю.Р. Магасумова, и др. // Биомика, 2020, Том 12 № 1. – С. 57-79.
13. Берестова, А.В. Основы функционального питания: учебное пособие / А.В. Берестова. – Оренбург: ОГУ, 2021. – 167 с.
14. Цикорий растворимый порошкообразный: польза и вред – URL: <https://food-tips.ru>
15. Зангиева, М.С. Способ производства йогурта: патент / М.С. Зангиева, З.Р. Ибрагимова, С.А. Бекузарова С. А. <https://findpatent.ru/patent/247/2475029.html>
16. Натуральные ингредиенты BENEО для молочных продуктов. <https://www.beneo.com/ru/пищевые-продукты/пи->

шевые-продукты-сп/молочные-продукты

17. Погосян, Д.Г. Технология производства цельномолочных продуктов: практикум / Д.Г. Погосян. – Пенза: РИО ПГСХА, 2015. – 144 с.

18. Лозманова, С.Е. Разработка и исследование технологии функционального кисломолочного продукта с экстрактом шиповника и пищевыми волокнами: автореферат дис. ... кандидата технических наук / С.Е. Лозманова. – Кемерово. 2014. – 16 с.

19. Кролевец, А.А. Способ получения йогурта, обогащенного экстрактом шиповника – Патент. 2017. https://ruseb.ru/catalog/000224_000128_2015157406_20170706_A+_RU/?ysclid=loi9yhg1il484340019

20. ГОСТ 31981-2013 Йогурты. Общие технические условия. <https://docs.cntd.ru/document/1200107778>

Статья поступила в редакцию 05.11.2023

Статья принята к публикации 15.12.2023

УДК 663.52

EDN: FBRXRХ

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ЗАТРАТ ПРИ ГИДРОФЕРМЕНТАТИВНОЙ ОБРАБОТКЕ ЗЕРНА НА СПИРТ С ЦЕЛЬЮ ИХ ОПТИМИЗАЦИИ И СОКРАЩЕНИЯ

© Авторы 2023

SPIN: 6740-0494

AuthorID: 624262

ORCID: 0000-0003-1277-5498

ScopusID: 7219087698

ТУРШАТОВ Михаил Владимирович, кандидат технических наук,
заведующий отделом технологии спирта и комплексной переработки сырья
ВНИИПБТ – филиал ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии»
(111033, Россия, Москва, улица Самокатная, 4Б, e-mail: lab78@mail.ru)

SPIN: 5838-9794

AuthorID: 688721

ORCID: 0000-0003-2951-9802

ScopusID: 57219093308

КРИВЧЕНКО Вера Александровна, кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник лаборатории комплексной переработки сырья
ВНИИПБТ – филиал ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии»
(111033, Россия, Москва, улица Самокатная, 4Б, e-mail: lab78@mail.ru)

SPIN: 2383-4231

AuthorID: 830354

ORCID: 0000-0003-2666-6890

ResearcherID: HDN-8300-2022

ScopusID: 57301371900

СОЛОВЬЕВ Александр Олегович, младший научный сотрудник
лаборатории комплексной переработки сырья
ВНИИПБТ – филиал ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии»
(111033, Россия, Москва, улица Самокатная, 4Б, e-mail: lab78@mail.ru)

SPIN: 3570-2841

AuthorID: 1105971

ORCID: 0000-0001-5314-3513

ScopusID: 57263183600

НИКИТЕНКО Виктория Дмитриевна, аспирант,
инженер-технолог лаборатории комплексной переработки сырья
ВНИИПБТ – филиал ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии»
(111033, Россия, Москва, улица Самокатная, 4Б, e-mail: lab78@mail.ru)

Аннотация. В настоящее время, существует несколько вариантов снижения тепловых затрат при водно-тепловой и ферментативной обработке зернового сырья с получением этилового спирта. Одним таких вариантов является снижение гидромодуля, на стадии приготовления замеса. Данные, приведенные в работе, рассматривают изменения, происходящие в материальном потоке, при разных вариантах гидромодуля: от 2,0 до 3,5. В зависимости от гидромодуля, закономерно происходит пропорциональное изменение всех сырьевых и эксплуатационных затрат: вода, электричество, пар. Кроме того, приводятся исследования по применению различных режимов (65-95-140°C) водно-тепловой и ферментативной обработки сырья. Полученные экспериментальные данные по гидроферментативной обработке сырья при низкой температуре (65°C) с использованием оптимизированного комплекса ферментных препаратов и последующим сбраживанием показали, что такой энергосберегающий режим обеспечивает эффективное решение основных технологических задач, а высокая степень эффективности достигается за счет синергетического действия ферментных препаратов, используемых на стадии разжижения и осахаривания, что позволяет ускорить процессы растворения и гидролиза полисахаридов сырья. Рассматриваемая схема позволяет снизить тепловые и эксплуатационные затраты, а также упрощает процесс проведения гидроферментативной обработки сырья. Данные по удельному расходу пара, показывают, что при увеличении гидромодуля от 2,0 до 3,5 происходит увеличение расхода пара в 1,5 раза. При условии использования низкотемпературной схемы водно-тепловой и ферментативной обработки сырья, возможно суммарное сокращение расхода пара в 4 раза. Полученные данные доказывают высокую эффективность и перспективу для внедрения энергосберегающей схемы гидроферментативной обработки сырья.

Ключевые слова: производство спирта, водно-тепловая обработка, гидромодуль, температура нагрева, расход пара, ферментативный комплекс, выход спирта, снижение затрат.

**INVESTIGATION OF THERMAL COSTS DURING HYDROFERMENTATIVE PROCESSING
OF GRAIN FOR ALCOHOL IN ORDER TO OPTIMIZE AND REDUCE THEM**

©Authors 2023

TURSHATOV Mikhail Vladimirovich, candidate of technical sciences,
head of the Department of Alcohol Technology and complex processing of raw materials

VNIIPBT – branch of FGBUN "FITZ Nutrition and Biotechnology"
(4B Samokatnaya Street, Moscow, 111033, Russia, e-mail: lab78@mail.ru)

KRIVCHENKO Vera Alexandrovna, candidate of technical sciences,
leading researcher of the Laboratory of complex processing of raw materials

VNIIPBT – branch of FGBUN "FITZ Nutrition and Biotechnology"
(4B Samokatnaya Street, Moscow, 111033, Russia, e-mail: lab78@mail.ru)

SOLOVYOV Alexander Olegovich, junior researcher at the laboratory of complex processing of raw materials

VNIIPBT – branch of FGBUN "FITZ Nutrition and Biotechnology"
(4B Samokatnaya Street, Moscow, 111033, Russia, e-mail: lab78@mail.ru)

NIKITENKO Victoria Dmitrievna, graduate student,
Engineer-technologist of the laboratory of complex processing of raw materials

VNIIPBT – branch of FGBUN "FITZ Nutrition and Biotechnology"
(4B Samokatnaya Street, Moscow, 111033, Russia, e-mail: lab78@mail.ru)

Abstract. Currently, there are several options for reducing heat costs during water-thermal and enzymatic processing of grain raw materials to produce ethyl alcohol. One such option is to reduce the hydraulic module at the batch preparation stage. The data presented in the work consider the changes occurring in the material flow with different options for the hydraulic module: from 2.0 to 3.5. Depending on the hydraulic module, there is naturally a proportional change in all raw materials and operating costs: water, electricity, steam. In addition, studies are presented on the use of various modes (65-95-140°C) of water-thermal and enzymatic processing of raw materials. The experimental data obtained on the hydroenzymatic processing of raw materials at low temperature (65°C) using an optimized complex of enzyme preparations and subsequent fermentation showed that such an energy-saving mode provides an effective solution to basic technological problems, and a high degree of efficiency is achieved due to the synergistic effect of the enzyme preparations used at the stage of liquefaction and saccharification, which allows accelerating the processes of dissolution and hydrolysis of raw material polysaccharides. The scheme under consideration makes it possible to reduce thermal and operating costs, and also simplifies the process of hydroenzymatic processing of raw materials. Data on specific steam consumption show that when the hydraulic module increases from 2.0 to 3.5, the steam consumption increases by 1.5 times. Provided that a low-temperature scheme of water-thermal and enzymatic processing of raw materials is used, a total reduction in steam consumption by 4 times is possible. The data obtained prove high efficiency and prospects for the implementation of an energy-saving scheme for hydroenzymatic processing of raw materials.

Keywords: alcohol production, water-heat treatment, hydromodule, heating temperature, steam consumption, enzymatic complex, alcohol yield, cost reduction, economy.

Для цитирования: Туришатов М.В. Исследование тепловых затрат при гидроферментативной обработке зерна на спирт с целью их оптимизации и сокращения / М.В. Туришатов, В.А. Кривченко, А.О. Соловьев, В.Д. Никитенко // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 13. – №4(64). – С. 166-171. – EDN: FBRXR.

Введение. Этиловый спирт выступает в роли товара широкого потребления в медицинской, пищевой, топливной и технической сферах производства. Тем не менее, в силу ряда факторов, рынок сбыта и применения спирта в России ограничен, что способствует образованию избыточных мощностей по его производству. В связи с этим, каждый производитель заинтересован не только в получении продукта высшего качества, который отвечает всем нормативным требованиям, но и снижению его себестоимости для обеспечения возможности его конкурентного предложения на рынке готовой продукции. Выполнение последнего требования, как правило, возможно при снижении производственных затрат. Данная работа является продолжением аналитических исследований, про-

водимых во ВНИИПБТ по выявлению резервов для снижения себестоимости спирта [1-3], в которых был разработан алгоритм подбора зерна с учетом его вида, крахмалистости, обеспечивающий минимизацию сырьевых затрат на производство спирта. В структуре себестоимости этилового спирта, производимого в России, доля затрат на энергоресурсы стоит на втором месте после сырьевых и составляет порядка 15% [4, 5]. Значительная их часть приходится на тепловые затраты. Основным теплоносителем на заводе является острый пар. Стоимость 1 тонны пара в среднем составляет 1-1,5 тысячи рублей. Одним из наиболее энергоемких технологических процессов, где используется пар, является нагрев зернового замеса на стадии водно-тепловой обработки [5, 6]. Удельный расход пара при этом зависит от

температурного режима и количества замеса, которое определяется гидромодулем – соотношением зерно/вода в процессе его приготовления [5]. Необходимо отметить, что данный параметр оказывает наиболее существенное влияние на все эксплуатационные затраты [7,8].

В таблице 1, приведено расчетное количество

замеса, необходимого для получения 1 дал спирта из типового сырья – пшеницы, которая наиболее широко применяется в промышленности. Условная крахмалистость пшеницы принята за 56%. При приготовлении замеса, в качестве жидкой фазы, применили 70% артезианской воды и 30% фугата барды с концентрацией сухих веществ не менее 5%.

Таблица 1 – Количество зернового замеса для получения 1 дал спирта

Сырье	Гидромодуль			
	2,0	2,5	3,0	3,5
Пшеница, кг	27,9	27,9	27,9	27,9
Вода, кг	39,1	48,8	58,6	68,3
Фугат барды, кг	16,7	20,9	25,1	29,3
Зерновой замес, кг	83,7	97,6	111,6	125,5

Приведенные данные, свидетельствуют, что увеличение гидромодуля от 2,0 до 3,5 способствует увеличению количества продуктового потока (замеса) до 1,5 раз. Это в свою очередь пропорционально увеличивает все эксплуатационные расходы, такие как расход пара, воды, электричества [9, 10].

На сегодняшний день, большинство заводов по производству спирта используют две схемы гидроферментативной обработки замеса: механико-ферментативная («мягкая» схема) и разваривание под давлением при повышенной температуре («жесткая» схема). В рамках «жесткой» схемы подразумевается нагревание развариваемой массы острым паром до температуры порядка 145°C и выдерживание под давлением до 4 атм. в варочном аппарате колонного типа на протяжении 40-60 минут. Применение современной, «мягкой» схемы разваривания, позволяет снизить рабочую температуру до 95°C с выдерживанием в аппарате гидроферментативной обработки (ГДФО) сырья на протяжении 120-180 минут. Эффективный гидролиз полисахаридов сырья в таком случае возможен благодаря применению комплекса ферментных препаратов, содержащих термостабильную α -амилазу.

Главной целью этапа водно-тепловой и ферментативной обработки сырья, не зависимо от схемы разваривания, является полное растворение и гидролиз полисахаридов сырья, основным из которых является крахмал. По литературным данным известно, что растворение крахмала возможно осуществить при достижении температуры 65°C. Данный факт широко использовался на раннем этапе развития «винокурения» (XVIII-XIX век), когда

за счет собственных ферментов зерна, особенно ржи, осуществляли процесс «самоосахаривания» [7, 11]. Более широко в технологии спиртового производства известен опыт использования в качестве осаживающего средства солода. Максимальное температурное воздействия на него составляет 60°C в течение 40-60 минут. Тем не менее, весь крахмал солода, в процессе осаживания и брожения, переходит в растворимое состояние, гидролизуется и сбраживается [12, 13].

Современное оборудование и комплексы ферментных препаратов позволяют данный процесс осуществить в более интенсивном режиме [14, 15].

Методология. Проведенные исследования были направлены на оценку возможности гидроферментативной обработки пшеничного замеса при температуре не выше 65°C с последующим сбраживанием и применением оптимизированного комплекса ферментных препаратов.

Исходное сырье – пшеница, параметры которой приведены в таблице 2.

В исследованиях применяли ферментные препараты компании *Novozymes* (Дания) характеристика которых приведена в таблице 3 [16].

В исследованиях использовали замес с гидромодулем 1:2,75. Измельчение и гомогенизацию зерна проводили при помощи технологии гидропомола на лабораторном диспергаторе *ИКА* (Германия) при частоте вращения ротора 10 000 об/мин. Степень измельчения составила – 95%-ный проход замеса через сито с диаметром ячейки 1 мм.

Режимы тепловой и ферментативной обработки сырья приведены в таблице 4.

Таблица 2 – Параметры исходного сырья

Параметр	Значение
Сырье	Пшеница
Помол, проход через сито с диаметром ячейки 1 мм, не менее %	95
Условная крахмалистость, %	55,9±0,1
Массовая доля влаги, %	11,8±0,1
Массовая доля сорной примеси, %	0,8±0,1

Таблица 3 – Характеристика ферментных препаратов, применяемых в исследованиях

Ферментный препарат	Целевой фермент	Активность	pH	Оптимальная температура, °C	Норма расхода препарата
Viscoferm	Ксиланаза	900 ед. КС/см ³	от 5,5 до 6,5	от 50 до 75	0,2 ед/г СВ* зерна
Liquoflow Go 2x	Термостабильная α-амилаза	1200 ед. АС/см ³	от 5,7 до 6,5	от 85 до 88	0,25 ед/г усл. крахмала
Saczyme Plus 2X	Глюкоамилаза	22 000 ед. ГлС/см ³	от 4,0 до 5,5	от 30 до 65	9,0 ед/г усл. крахмала
BAN 480 LS	Мезофильная α-амилаза	3500 ед. АС/см ³	от 5,5 до 7,0	от 60 до 70	1,0 ед/г усл. крахмала

* СВ – Сухое вещество

Таблица 4 – Режим тепловой и ферментативной обработки сырья

Параметры	Контроль	Опыт
Температура, °C	85-90	63-65
Продолжительность, мин.	150	180
Ферментные препараты:		
- Ксиланаза, ед. КС/г СВ зерна	0,2	0,2
- Термостабильная α-амилаза, ед. АС/г усл. крах.	0,25	-
- Мезофильная α-амилаза, ед. АС/г усл. крах.	-	1,0
- Глюкоамилаза, ед. ГлС/г усл. крах.	9,0	9,0
Антисептик, г/т	2,0	2,0

Ферментный препарат глюкоамилазы в контрольном варианте вводили после водно-тепловой обработки, а в опытном до, на стадии приготовления замеса. Брожение осуществляли при температуре $33 \pm 1^\circ\text{C}$ с использованием сухих спиртовых дрожжей «Ангел» (КНР) в течение 72 часов.

Статистическую обработку экспериментальных данных проводили, рассчитывая среднее значение определяемой величины не менее чем из 3-х повторностей и их среднеквадратичное отклонение.

Результаты. Итоговые технологические показатели по сбраживанию экспериментальных образцов суслу приведены в таблице 5.

Полученные данные свидетельствуют о том, что все параметры опытного образца близки к параметрам контрольного образца. Исключение составляет концентрация остаточных углеводов, которая в опытном образце почти на 40% ниже, чем в контрольном. Этот факт доказывает высокую эффективность гидроферментативной обработки

сырья, что позволяет растворить и гидролизовать максимальное количество полисахаридов сырья, которые в последствии ассимилируются дрожжами. С этим же связан более высокий выход спирта в опытном образце, что потенциально повышает рентабельность производства и чистую прибыль от реализации товарной продукции.

Подобные результаты с проведением исследования по возможности низкотемпературной схемы водно-тепловой и ферментативной обработки сырья получены впервые, что имеет важное прикладное значение и научный интерес в развитии данной технологии. Возможность эффективного проведения гидроферментативной обработки при температуре 65°C возможно за счет синергетического эффекта ферментных препаратов. Одновременное действие разжижающих и осахаривающих ферментов повышает их гидролитический эффект и обеспечивает высокие технологические свойства замеса и полупродуктов.

Таблица 5 – Технологические показатели после сбраживания суслу

Показатели	Контроль	Опыт*
Видимая плотность в бражке, °Б	0,20±0,05	0,30±0,05
pH	4,26±0,22	4,39±0,22
Титруемая кислотность, град.	0,47±0,03	0,49±0,03
Объемная доля этилового спирта, % об.	10,41±0,20	10,46±0,20
Остаточные углеводы:		
- несброженные, г/100 см ³	0,31±0,07	0,18±0,07
- нерастворенный крахмал, г/100 см ³	0,11±0,01	0,07±0,01
- декстрины, г/100 см ³	0,21±0,03	0,12±0,03
Выход спирта, дал/тук**	66,45±0,12	66,61±0,09

*представлены усредненные данные из трех параллельных опытов;

**дал/тук – декалитров на тонну условного крахмала.

Стоит отметить, что возможность использования низкотемпературной схемы водно-тепловой и ферментативной обработки, критически зависит от микробиологической чистоты полупродуктов процесса, поскольку сверхнормативное нарастание кислотности в процессе брожения на 0,2 градуса, снижает содержание спирта в зрелой бражке на 0,1% об. Так, появляется необходимость использовать современные способы мойки зернового сырья. Кроме того, известно, что основным источником появления посторонней микрофлоры в полупродуктах спиртового производства является некачественное сырье, наличие «застойных» зон в оборудовании, трубопроводах, запорной арматуре, режимах их мойки и стерилизации [17, 18]. Как правило, технологический Регламент предусматривает ряд мероприятий, обеспечивающих устойчивость процессов к инфицированию.

Наиболее эффективным из них является мойка и обеззараживание зернового потока, поступающего на переработку [19, 20].

С целью обеззараживания зернового потока,

во ВНИИПБТ, была разработана аппаратурно-технологическая схема, включающая вибрационную мойку зерна озонированной водой [21]. Такая обработка обеспечивает микробиологическую чистоту сырья и эффективно сочетается со схемой низкотемпературной водно-тепловой и ферментативной обработки, что в свою очередь, снижает эксплуатационные затраты, сокращает технологические потери, повышает показатели качества спирта.

Использование низкотемпературной схемы позволяет значительно упростить аппаратурную схему водно-тепловой обработки зернового замеса (рис. 1), в котором осуществляется одновременное протекание процессов растворения и гидролиза полисахаридов сырья. При данном режиме потребление пара сокращается на 5 кг/дал в сравнении со схемой мягкого разваривания [5]. Схема низкотемпературной обработки зернового сырья (1-смеситель; 2,4-насос; 3.1, 3.2-аппараты ГДФО; 5-теплообменник; 6-сборник жидкой фазы) представлена на рисунке 1.

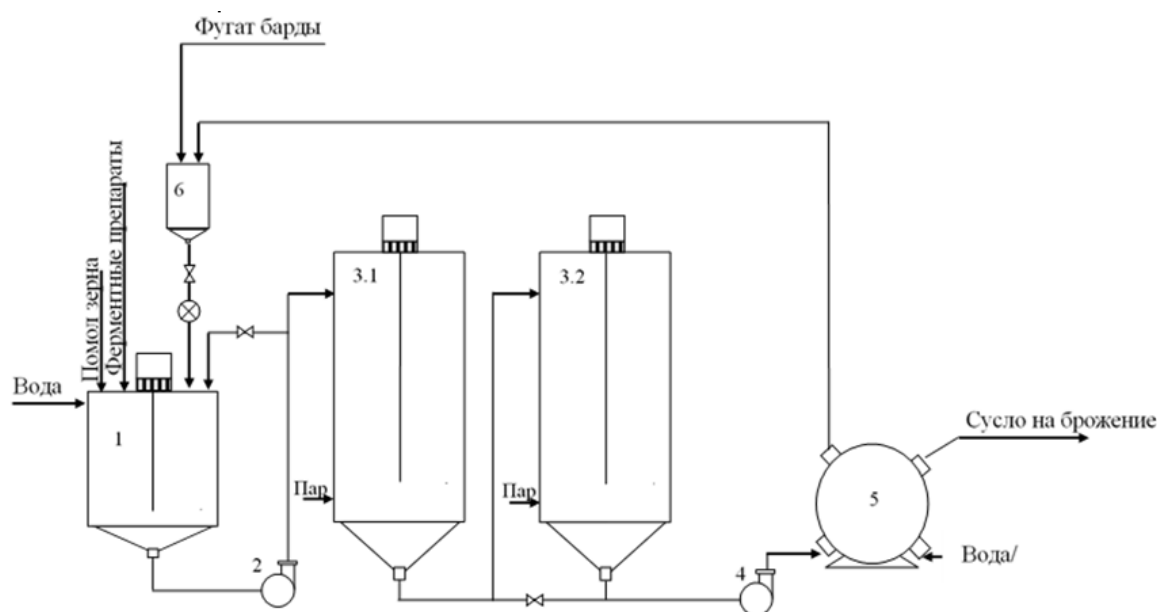


Рисунок 1 – Схема водно-тепловой обработки зернового замеса

Обсуждение. Предлагаемая схема гидроферментативной обработки сырья способствует эффективному переводу полисахаридов сырья в сбраживаемую форму, благодаря чему увеличивается выход спирта, рентабельность производства и снижается потребление энергетических ресурсов,

например таких как потребление пара.

В таблице 6, приведены данные по удельному расходу пара в кг/дал производимого спирта при гидроферментативной обработке зернового замеса гидромодулем от 2,0 до 3,5 и температуре от 65 до 140°C.

Таблица 6 – Расход пара при водно-тепловой обработке зернового замеса, кг/дал

Режим сбраживания	Температура нагрева, °C	Гидромодуль замеса			
		2,0	2,5	3,0	3,5
«Жесткий»	40→140	13,61	16,39	19,22	22,04
«Мягкий»	40→95	6,89	8,29	9,72	11,15
Энергосбережение	40→65	2,97	3,58	4,20	4,81

Так, во время применения энергосберегающей схемы водно-тепловой и ферментативной обработки сырья, расходуется всего 4,81 кг пара на производство 1 декалитра спирта. Это почти на 80% ниже, чем при использовании «жесткой» схемы разваривания и на 40% ниже, чем при использовании «мягкой» схемы.

Выводы. В ходе проведения работ была впервые доказана возможность проведения процесса разжижения одновременно с процессом осахаривания зернового сырья при температуре, не превышающей 65°C. Технологическая эффективность достигается за счет явления синергетического действия ферментных препаратов, входящих применяемый в амилотический комплекс.

В результате анализа полученных данных, доказана возможность эффективного применения низкотемпературной гидроферментативной обработки сырья при температуре, не превышающей 65°C. Это позволяет сократить затраты тепла, по сравнению с «жестким» режимом почти в 4 раза, а с «мягким» в более чем в 2 раза. В пересчете на 1000 дал спирта экономия пара на данной стадии производства при гидромодуле 3 составит 15 т по сравнению с «жесткой» схемой и 5,5 т по сравнению с «мягкой», что для завода мощностью 10 000 дал в сутки при стоимости пара на уровне 1200 рублей за 1 тонну обеспечивает годовую экономию в размере 21 – 57 млн. руб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- Абрамова И.М., Туршатов М.В., Леденев В.П., Кононенко В.В., Кривченко В.А., Соловьев А.О., Никитенко В.Д. Влияние мощности производства этилового спирта на его техникоэкономические показатели. // Сборник трудов Международной научно-практической конференции «Основные направления развития технологии глубокой переработки крахмалсодержащего и инулинсодержащего сырья». 22 сентября 2022 г. – М.: ВНИИК – филиал ФГБНУ «ФИЦ картофеля имени А.Г. Лорха». 2022. 235 с.
- Schestak I., Spriet J., Black K., Styles D., Faragó M., Rygaard M., Williams A. P. Heat recovery and water reuse in micro-distilleries improves eco-efficiency of alcohol production // *Journal of Environmental Management*, Vol. 325, Part A, 2023, 116468. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116468>
- Туршатов М.В., Соловьев А.О., Абрамова И.М., Кононенко В.В., Леденев В.П., Кривченко В.А., Никитенко В.Д. Исследование влияния видов зернового сырья на себестоимость этилового спирта с учетом выпуска дополнительной продукции. // Теоретические и практические аспекты развития спиртовой и ликероводочной промышленности Сборник научных трудов по материалам Международного научно-практического семинара. М.:Первое экономическое издательство. 2022. №109. С. 116. <https://doi.org/10.18334/9785912924460.109-116>.
- Kordana-Obuch S., Starzec M. Experimental development of the horizontal drain water heat recovery. // *Unit. Energies*. 2023. №16. P. 4634. <https://doi.org/10.3390/en16124634>
- Энергосберегающие аспекты технологии переработки зерна в этиловый спирт / М.В. Туршатов, В.П. Леденев, В.А. Кривченко и др. // *Достижения науки и техники АПК*. 2022. Т. 36. №7. С. doi: 10.53859/02352451_2022_36_7_0
- Леденев В.А., Петро Р.А., Чурмасов М.Е., Журба О.С., Кононенко В.В. Гидроизмельчение – эффективный способ подготовки зерна для всех технологий спиртового производства. // *Прогрессивные технологии и современное оборудование – важнейшие составляющие успеха экономического развития предприятий спиртовой и ликероводочной промышленности.*–М.: Пищепромиздат. 2003. №6. С. 11.
- Горюшкина Н.Е. "Хлебное вино на радость дано": о домашнем дворянском винокурении в конце XVIII - начале XIX века. // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: История и право*. 2020. №10(6). С. 212-221.
- Ramírez-Márquez C., Segovia-Hernández J.G., Mansouri S.S. Alcohol production process design and scale-up. // Editor(s): Hamid Amiri, Meisam Tabatabaei, Abdul-Sattar Nizami. In *Biomass and Biofuels. Higher Alcohols Production Platforms*. Academic Press. 2024. P. 237-269. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91756-8.00008-6>. Скрипка Я. В. Энергосбережение спасет от падения рентабельности пищевой промышленности // *Вопросы экономических наук*. – 2014. – № 2(66). – С. 21-52.
- Rašković P., Anastasovski A., Markovska Lj., Meško V. Process integration in bioprocess industry: waste heat recovery in yeast and ethyl alcohol plant. // *Energy*. 2010. Vol. 35. Iss. 2. P. 704-717. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.11.020>
- Hernández J.G.S., Gómez-Castro F.I., Romero-Izquierdo A.G., Conde-Mejía C., López-Molina A. Partial energy integration between biofuels production processes: Effect on costs, CO2 emissions and process safety. // *Process Safety and Environmental Protection*. 2022. Vol. 159. P. 918-930. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.01.069>.
- Протасов И.А. Энергосбережение в промышленной области // *Вестник магистратуры*. – 2016. – № 4-1(55). – С. 63-65.
- Бурчиц Е.А. Энергосбережение как основополагающий фактор устойчивости предприятия // *Актуальные вопросы современной экономики*. – 2017. – № 6. – С. 126-128.
- Сербя Е.М., Римарева Л.В., Погорельская Н.С., Мочалина П.Ю. Ферментативный комплекс для биокаталитической деструкции полимеров микробного и растительного сырья. // *Acta Naturae*. 2016. №S2. С. 236-237.
- Rosa L.P., Tolmasquim M.T., Arouca M.C. Potential for reduction of alcohol production costs in Brazil // *Energy*. 1998. Vol. 23. Iss. 11. P. 987-995. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(98\)00046-2](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(98)00046-2)
- Guedes do Nascimento L., Monteiro L.P.C., Simões R.C.C., Prata D.M. Eco-efficiency analysis and intensification of the biodiesel production process through vapor recompression strategy. // *Energy*. 2023. Vol. 275. P. 127479. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127479>.
- Технологическая инструкция по применению ферментных препаратов компании «Новозаймс А/С» в технологии переработки крахмалсодержащего сырья на спирт. ВНИИПБТ. 2022.
- Кудряшов В.Л., Фурсова Н.А., Алексеев В.В., Лукин Н.Д. Основы создания малых пищевых предприятий с использованием мембранных установок в современных условиях. // *Пищевая промышленность*. 2018. №3. С. 36-43.
- Li H., Wang W., Wang Y., Li C., Wang Y., Zhu Z., Cui P., Li X., Li Y. Dynamic real-time energy saving control of pressure-swing distillation based on artificial neural networks. // *Chemical Engineering Science*. 2023. Vol. 282. P. 119271. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.119271>
- Towler G., Sinnott R. Chapter 8 - Estimating revenues and production costs // Editor(s): Gavin Towler, Ray Sinnott. *Chemical Engineering Design (Third Edition)*. Butterworth-Heinemann. 2022. P. 279-304. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821179-3.00008-X>.
- Cowan A.E., Klass S.H., Winegar P.H., Keasling J.D. Microbial Production of Fuels, Commodity Chemicals, and Materials from Sustainable Sources of Carbon and Energy. // *Current Opinion in Systems Biology*. 2023. P. 100482. <https://doi.org/10.1016/j.coisb.2023.100482>
- Кононенко В.В., Туршатов М.В., Леденев В.П., Соловьев А.О., Кривченко В.А., Моисеева Н.Д. Эффективность применения озона для обеззараживания зерна в спиртовом производстве. // *Пиво и напитки*. 2017. №5. С. 20-22. <https://doi.org/10.18334/9785907063556>

Научно-исследовательская работа проведена за счет средств субсидии на выполнение государственного задания (тема № FGMF-2022-0006).

Статья поступила в редакцию 03.11.2023

Статья принята к публикации 15.12.2023

УДК 658.788.46:621.798:615.322

EDN: JLMZIH

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ И БИОРАЗЛАГАЕМОСТИ УПАКОВКИ АРМИРОВАННОЙ ЛУЗГОЙ ГРЕЧИХИ

© Авторы 2023

SPIN: 6311-7380

AuthorID: 1126823

ORCID: 0000-0003-0689-0166

СЕМУХИН Александр Сергеевич, аспирант

Уральский государственный экономический университет

(620144, Россия, Екатеринбург, улица 8 Марта/Народной Воли, 62/45, e-mail: alexander@semuhin.ru)

SPIN: 5442-4264

AuthorID: 525546

ORCID: 0000-0001-5458-8565

ScopusID: 57190430444

ЗАВОРОХИНА Наталия Валерьевна, доктор технических наук, доцент,

профессор кафедры технологии питания

Уральский государственный экономический университет

(620144, Россия, Екатеринбург, улица 8 Марта/Народной Воли, 62/45, e-mail: degustator@olympus.ru)

SPIN: 2615-4939

AuthorID: 881294

ORCID: 0000-0001-7642-6532

ТАРАСОВ Алексей Валерьевич, младший научный сотрудник

Уральский государственный экономический университет

(620144, Россия, Екатеринбург, улица 8 Марта/Народной Воли, 62/45, e-mail: tp@usue.ru)

Аннотация. В современном мире наблюдается устойчивый интерес к рациональному использованию природных ресурсов и разработке биоразлагаемых материалов. Многотоннажные агроотходы, в том числе лузга гречихи, могут быть переработаны в биоразлагаемые полимеры для пищевой упаковки. Целью этой работы было исследование физико-механических свойств, внешнего вида и биоразлагаемости композитов, армированных лузгой гречихи, в сравнении с контролем. Изготовлены плоские опытные образцы на основе порошка лузги гречихи и вспененного полистирола в соотношении 1,5:1, 1:1, 0,7:1, 0,5:1 и 0,2:1, определены их водопоглощение и прочность на изгиб. Изучена микроструктура поверхности лузги гречихи. Ферментный препарат ЦеллоЛюкс-Ф использовали для улучшения гидрофильных свойств и повышения площади активной поверхности биокомпозитов. Биоразлагаемость образцов оценивали в грунте марки «Фаско» в течение 1-3 месяцев по убыли массы. Образец № 2, изготовленный на основе порошка лузги гречихи и вспененного полистирола в соотношении 1,5:1 и обработанный ферментом ЦеллоЛюкс-Ф, продемонстрировал наибольшую водопоглощающую способность. Представлены данные о нелинейной скорости биоразложения: степень деградации образцов нарастает по мере увеличения площади соприкосновения с микробиотой грунта. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования лузги гречихи в качестве армирующего материала при производстве биоразлагаемой упаковки.

Ключевые слова: лузга гречихи, вспененный полистирол, биоразлагаемая упаковка, пищевая упаковка, водопоглощение, прочность на изгиб, биокомпозит, фермент ЦеллоЛюкс-Ф, грунт «Фаско».

STUDY OF THE PROPERTIES AND BIODEGRADABILITY OF PACKAGING REINFORCED WITH BUCKWHEAT HUSK

© The Authors 2023

SEMUKHIN Aleksandr Sergeevich, post-graduate student

Ural State University of Economics

(620144, Russia, Ekaterinburg, street 8 March/Narodnoy Voli, 62/45, e-mail: alexander@semuhin.ru)

ZAVOROKHINA Natalia Valerievna, doctor of technical sciences, associate professor,

professor of the Food Technology Department

Ural State University of Economics

(620144, Russia, Ekaterinburg, street 8 March/Narodnoy Voli, 62/45, e-mail: degustator@olympus.ru)

TARASOV Alexey Valerievich, junior researcher

Ural State University of Economics

(620144, Russia, Yekaterinburg, 8 Marta Street/Narodnaya Volya, 62/45, e-mail: tp@usue.ru)

Abstract. In the modern world, there is a steady interest in the rational use of natural resources and the development of biodegradable materials. Large-tonnage agricultural waste, including buckwheat husks, can be processed into biodegradable polymers for food packaging. The purpose of this work was to study the physical and mechanical properties,

appearance and biodegradability of composites reinforced with buckwheat husks in comparison with the control. Flat prototypes were made based on buckwheat husk powder and foamed polystyrene in a ratio of 1,5:1, 1:1, 0,7:1, 0,5:1 and 0,2:1, and their water absorption and bending strength were determined. The microstructure of the surface of buckwheat husks has been studied. The enzyme preparation CelloLux-F was used to improve the hydrophilic properties and increase the active surface area of biocomposites. The biodegradability of the samples was assessed in Fasco brand soil for 1-3 months based on weight loss. Sample No. 2, made from buckwheat husk powder and foamed polystyrene in a ratio of 1,5:1 and treated with the CelloLux-F enzyme, demonstrated the greatest water absorption capacity. Data are presented on the nonlinear rate of biodegradation: the degree of degradation of samples increases as the area of contact with soil microbiota increases. The results obtained indicate the prospects of using buckwheat hulls as a reinforcing material in the production of biodegradable packaging.

Keywords: buckwheat husk, foamed polystyrene, biodegradable packaging, food packaging, water absorption, bending strength, biocomposite, CelloLux-F brand enzyme, Fasco brand soil.

Для цитирования: Семухин А.С. Исследование свойств и биоразлагаемости упаковки, армированной лузгой гречихи / А.С. Семухин, Н.В. Заворохина, А.В. Тарасов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 12. – № 4(64). – С. 172-177. – EDN: JLMZIH.

Введение. В современном мире интерес к инновационным материалам для использования их в производстве упаковки растет постоянно. При этом к материалам предъявляются следующие свойства: биоразлагаемость, биосовместимость и экономическая доступность.

Сегодня около 30% вырабатываемых в мире пластмасс потребляется в виде упаковки продовольственных и непродовольственных продуктов [1]. Чрезмерное использование пластика и его накопление в природной среде пагубно влияют на биосферу Земли и здоровье населения так как скорость разложения пластика крайне низкая, а продукты его разложения могут попадать в поверхностные и паводковые воды, и, как следствие, в продукты питания человека. Утилизация данного вида упаковки значительно затруднена из-за невозможности ее сжигания без выделения химически вредных веществ в окружающую среду [2,3]. В настоящее время спрос на биоразлагаемые полимеры для использования их в качестве потенциального упаковочного материала ежегодно увеличивается на 15-20% [4,5]. Данные потребности на данный момент не удовлетворяются в полной мере так как производство биоразлагаемых полимеров является энергетически затратным и не доступно в странах с ограниченными энергетическими ресурсами. Россия, являясь страной с большими запасами углеводородов, обладает уникальными возможностями для создания предприятий по выпуску биоразлагаемой упаковки в т.ч. из вторичного сырья, продуктов переработки злаковых, циклического безотходного производства.

Согласно последним данным Европейского института биопластика, полученным в сотрудничестве с исследовательским институтом Nova-Institute, ожидается, что производственные мощности по производству пластика в мире увеличатся примерно с 2,417 млн. тонн в 2021 году до 7,593 млн. тонн в 2026 году, что значительно увеличит нагрузку на его утилизацию и потребует мер государственной поддержки, направленных на уменьшение вредных

выбросов и экологизацию переработки пластика. В Российской Федерации в рамках закона "Об охране окружающей среды" в редакции Федерального закона от 14 июля 2022 г. № 268-ФЗ "О внесении изменений в Федерального закона "Об отходах производства и потребления" приняты решения, направленные на увеличение доли использования вторичных ресурсов при производстве товаров, способствующие уменьшению объемов отходов, направляемых на полигоны, и, в итоге, снижению негативного воздействия на окружающую среду [6]. Основой для исследования и разработки нового вида упаковки является национальный проект «Экология», в котором отражены социальные и стратегические инициативы до 2030 года. Предлагается достичь более 50% вторичной переработки упаковки и сократить объемы захоронения твердых бытовых отходов [7,8].

Для достижения поставленных целей создается база нормативной документации, так в 2021 году вышел ГОСТ ISO 18601 «Упаковка и окружающая среда. Общие требования к использованию стандартов ISO в области упаковки и окружающей среды», в 2021 году вышел ГОСТ ISO 18602-2021 «Упаковка и окружающая среда. Оптимизация систем упаковки», в 2022 году вышел ГОСТ ISO 18606-2022 «Упаковка и окружающая среда. Переработка органическим способом».

Основные термины и определения в области методов деградации упаковки определены ГОСТ 33747-2016 «Оксо-биоразлагаемая упаковка», который предполагает, что упаковка может быть разлагаемой за счет абиотического разложения без микроорганизмов, биодegradации за счет клеточно-опосредованного явления, биотического разложения с воздействием живых микроорганизмов, деградации, оксо-деградации и оксо-био-деградации.

Классификация основных видов биоразлагаемой упаковки представлена авторами в работе [2,9] и включает такие группы как упаковка из растительного сырья (лузга гречихи, углеводсодержащие отходы, целлюлозы, отходы молочного произ-

водства и др); съедобные упаковочные пленки (на основе желатинов, пектина, альгинатов и продуктов переработки рыбной промышленности; полимеры с добавлением биокмозитов; и прочие отходы перерабатывающей промышленности (древесная мука, отруби, пшеничная солома, полиакриловая кислота и т.д.).

Много тоннажные агроотходы, такие как жмых сахарного тростника, лузга гречихи, молочная кислота, кукурузные стебли, пшеничная солома, могут быть переработаны для получения биоразлагаемых полимеров в качестве армирующего материала-наполнителя, который повышает деградацию компаундной упаковки в повышает ее

биоразлагаемость [10,11,12].

Особый интерес для исследований представляет лузга гречихи, которая представляет собой отделенные от зерна цветочные и плодовые оболочки и содержит до 50% клетчатки, 3-4% сырого протеина, 0,5-1% жира, 0,2-0,5% сахаров, 9-10% золы, содержит дубильные вещества, способна ингибировать коррозию металлов. При переработке гречихи получают 40-62% соломы, 68% крупы ядрицы, 20% лузги, 6% мучки [13]. Несмотря на то, что она считается вторичным продуктом при производстве гречневой крупы, ее химический состав (табл. 1) является достаточно богатым и включает в себя ряд пищевых и биологически активных веществ.

Таблица 1 – Химический состав лузги гречихи [11,14]

Ингредиенты/единица измерения	Количество
Белки,%	3,2-4,0
Жиры,%	0,4-0,9
Сахар, %	0,385
Моносахариды,% от общего содержания:	
– ксилоза;	63,03
– арабиноза;	4,24
– глюкоза;	16,36
– галактоза;	4,85
– уроновые кислоты	11,5
Крахмал, % на. сух. в-во	2
Полисахариды, % на. сух. в-во	
трудногидролизуемые: – целлюлоза, часть гемицеллюлоз;	25-30
– пентозаны;	19,8
– лигнин	31-35
Витамины, мг на 100г	
– А;	0,003
– В ₁ ;	0,16
– В ₂ ;	0,084
– Р;	28,8
– Е	2,3
Флавоноиды	0,02

Лузга гречихи не обладает пластичностью, необходимой для формования, поэтому необходимо подобрать компаунд – пластификатор, который будет не только повышать пластичность, но и способствовать биоразлагаемости упаковки. Исследуемые авторами ранее природные компаунды растительного и животного происхождения [3] показали высокую степень биоразлагаемости, но не достаточную пластичность. Использование же традиционных упаковочных материалов, таких как полиэтилен и полипропилен не целесообразно, так как они значительно снижают биоразлагаемость упаковки [13,15]. Поэтому разработка упаковки сочетающей в себе потребительские свойства традиционной пластиковой (пластичность, гибкость) и при этом имеющей высокую степень биоразлагаемости за счет внесения вторичного сырья, является важной задачей.

Таким образом, цель настоящих исследований – изучение физико-механических свойств и биоразлагаемости композитов, армированных лузгой гречихи в сравнении с контролем из вспененного полистирола.

Методология. Лузгу гречихи посевной сорта «Диана», измельченную методом ударного исти-

рания до величины частиц не более 500 мкм, использовали в качестве армирующего компонента. Вспененный полистирол с улучшенной способностью к газификации типа ПСВ-Л1 (EPS-L1) служил компаундом-пластификатором. Ферментный препарат ЦеллюЛюкс-Ф использовали для улучшения гидрофильных свойств лузги гречихи и увеличения активной поверхности соприкосновения. Композиционные составы на основе порошка лузги гречихи и вспененного полистирола готовили в следующих соотношениях: 1,5:1 (образец 1), 1:1 (образец 2), 0,7:1 (образец 3), 0,5:1 (образец 4) и 0,2:1 (образец 5). Биокмозиты готовили путем внесения навески порошка лузги гречихи, обработанного ферментным препаратом ЦеллюЛюкс-Ф, в расплав вспененного полистирола с последующим формированием слоя толщиной не более 3 мм. Биокмозиты высушивали естественным образом при температуре 22-24°C. Контрольным образцом служил вспененный полистирол без добавления лузги гречихи.

Структуру поверхности лузги гречихи исследовали на микроскопе «Микромед 100-900х». Водопоглощение биокмозитов определяли по

ГОСТ 4650-2014 путем погружения образцов на глубину не менее 25 мм при температуре $(23\pm 3)^\circ\text{C}$ в течение (48 ± 1) ч. Водопоглощение рассчитывали как отношение массы биокompозита до погружения в воду и после испытания. Исследование на изгиб плоских образцов биокompозитов и расчет прочности при изгибе проводили по ГОСТР 56810-2015. Исследование биоразлагаемости проводили путем помещения экспериментальных образцов в грунт марки «Фаско». Состав грунта: верховой торф, низинный торф, песок, доломитовая мука, комплексное минеральное удобрение с микроэлементами (азот – 350; фосфор – 400; калий – 500), pH – 6-7, массовая доля влаги поддерживалась 5-10%. Скорость разложения оценивали

по изменению массы биокompозита в течение 3 месяцев с шагом в 15 дней. Процент снижения массы определяли путем разницы начальной и конечной массы биокompозита. Внешний вид полученных композиционных составов исследовали экспертным путем визуально с использованием 5,0 балльной шкалы, где 5-отлично, 4-хорошо, 3-удовлетворительно, 2-неудовлетворительно, 1-неудовлетворительно неприемлемо, количество экспертов – 5 человек.

Результаты. Для понимания причины гидрофильности лузги гречихи исследовали поверхность частиц под микроскопом (рис. 1). Определено, что поверхность лузги пористая, с множеством трещин, что и объясняет ее гидрофильные свойства.



Рисунок 1 – Фото поверхности лузги гречихи под микроскопом 1×100

Поскольку лузга гречихи состоит из полисахаридов, образующихся за счет гликозидных связей (лигнин), то использование ферментных препаратов-целлюлаз, может способствовать разрушению лигнина и увеличению пористости частиц порошка из лузги гречихи, для чего ее обрабатывали замачиванием с ферментным препаратом ЦеллоЛюкс-Ф [12,13] в течение 24 часов. Увеличение гидрофильности способствует повышению влагосвязывающей способности, что делает возможной ее использование в качестве впитывающей упаковки, например, для влажных пищевых продуктов таких как фарш и охлажденное мясо, а также по гипотезе авторов может увеличивать скорость разложения биокompозита за счет большей биодegradации при помещении во влажную окружающую среду, снижать пожароопасность упаковки.

Полученный порошок из лузги гречихи после

обработки ферментом обладал хорошей сыпучестью, размеры частиц уменьшились с 500 мкм до 400 мкм (на 20%).

В таблице 2 представлены результаты оценки основных характеристик экспериментальных биокompозитов, армированных лузгой гречихи в сравнении с контрольным образцом. Результаты эксперимента свидетельствуют, что образец № 3, обработанный ферментом ЦеллоЛюкс-Ф порошком лузги гречихи в соотношении с вспененным полистиролом 1,5:1 обладает наибольшей водопоглощательной способностью. Образец данного биокompозита имел темно коричневый цвет, небольшой блеск, незначительную пластичность.

Далее исследовали биоразлагаемость образцов биокompозита непосредственно в грунте. На рисунке 2 приведены результаты оценки биодegradации образцов после 3 месяцев нахождения в грунте.

Таблица 2 – Оценка физико-механических и органолептических характеристик образцов исследования

Объект исследования	Водопоглощение, %	Прочность при изгибе, МПа	Оценка внешнего вида, балл
Контроль	$1,62 \pm 0,11$	$0,35 \pm 0,10$	$5,0 \pm 0,3$
Образец 1	$10,08 \pm 0,87$	$0,11 \pm 0,11$	$4,4 \pm 0,3$
Образец 2	$13,10 \pm 0,21$	$0,17 \pm 0,10$	$4,2 \pm 0,3$
Образец 3	$8,61 \pm 0,37$	$0,21 \pm 0,11$	$4,4 \pm 0,3$
Образец 4	$6,71 \pm 0,39$	$0,24 \pm 0,12$	$4,0 \pm 0,2$
Образец 5	$3,69 \pm 0,12$	$0,27 \pm 0,09$	$4,0 \pm 0,1$

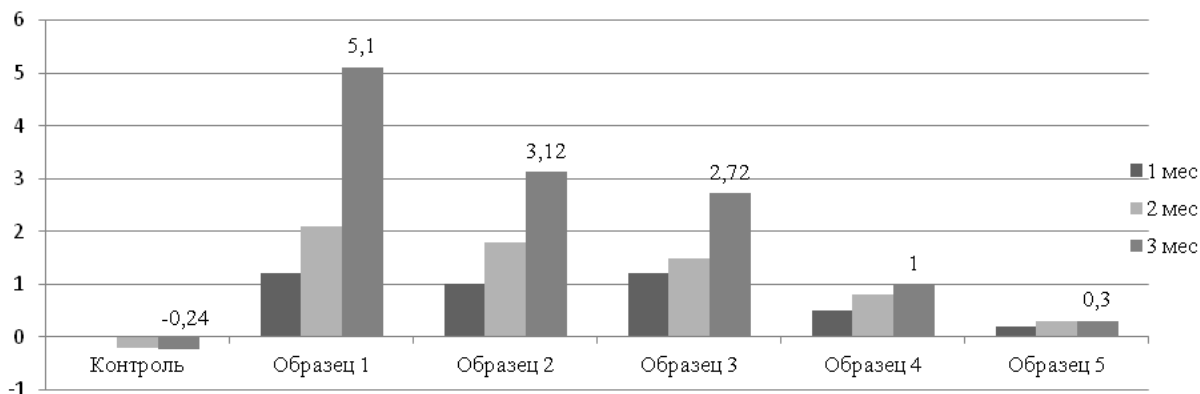


Рисунок 2 – Степень биоразложения образцов в динамике, %

Обсуждение. Результаты оценки водопоглощения упаковки на основе вспененного полистирола, армированного лузгой гречихи, указывают на прямую зависимость данного показателя от количества вносимого армирующего материала, что согласуется с данными других авторов [15,16]. При этом прочность при изгибе имеет функцию вида $y = 0,0009x + 0,222$. При оценке биоразлагаемости в грунте в течение 3 месяцев было установлено снижение массы у всех исследуемых образцов биокomпозитов, что свидетельствует об интенсивном процессе деградации за счет воздействия микробиоты грунта в процессе биогеохимического цикла разложения. Наиболее интенсивное снижение массы наблюдается у образца № 1 и составляет 5,1%, тогда как у контрольного образца, наоборот, зафиксировано увеличение массы за счет незначительного водопоглощения влаги из грунта. Получены данные о нелинейной скорости биоразложения и нарастании процесса по мере деградации биокomпозита и увеличения площади соприкосновения с микробиотой грунта.

Выводы. Разработка нового вида упаковки на основе вторичных сырьевых ресурсов биополимеров представляет большой интерес и открывает возможности для создания новых видов упаковки на основе биodeградируемых систем из полипропилена армированного лузгой гречихи. Работы по исследованию влияния размера частиц порошка из лузги гречихи, полученного после удаления из последней меланина и обработанного ферментами – целлюлазами, требуют дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Потапова Е.В. Проблема утилизации пластиковых отходов // Известия Байкальского государственного университета. – 2018. – Т. 28, № 4. – С. 535-544. – DOI 10.17150/2500-2759.2018.28(4).535-544. – EDN QNGYYX.
2. Заворохина Н.В., Семухин А.С. Перспективы использования сельскохозяйственных отходов для производства биоразлагаемой упаковки // Промышленность и сельское хозяйство. – 2022. – № 8(49). – С. 5-9. – EDN VWYR-VA.
3. Semukhin A.S., Zavorokhina N.V., Pastushkova E.V. Technological Properties Research of Biocomposites Based on the Natural Decomposable Compounds Reinforced with Buckwheat Husk // Food Industry/Индустрия питания. – 2023. – Vol. 8.

– No. 1. – P. 92-99. – DOI 10.29141/2500-1922-2023-8-1-10. – EDN SZQQWO.

4. Школьникова М.Н., Кадрицкая Е.А. Обоснование использования лузги гречихи для получения функциональных пищевых красителей // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. – 2020. – № 4(46). – С. 22-28. – DOI 10.17586/2310-1164-2020-10-4-22-28. – EDN JDKISV.

5. Biodegradable Polymer-Based Food Packaging / Ed. by A.D. Tripathi, K.K. Darani, D.C. Rai, V. Paul. – Singapore: Springer, 2022. – P. 1-11. – DOI 10.1007/978-981-19-5743-7_1.

6. Потороко И.Ю., Малинин А.В., Цатуров А.В., Игнатова А.В. Биоразлагаемые композитные материалы на основе картофельного крахмала и поливинилового спирта // Индустрия питания. – 2022. – Т. 7. – № 4. – С. 95-102. DOI 10.29141/2500-1922-2022-7-4-11. – EDN OOOZPLX.

7. Nawirska-Olszańska A., Figiel A., Płaskowska E., Twardowski J., Gębarowska E., Kucharska A.Z., Sokół-Łętowska A., Szychaj R., Lech K., Liszewski M. Qualitative and Quantitative Assessment of Buckwheat Husks as a Material for Use in Therapeutic Mattresses // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2021. – Vol. 18. – No. 4. – P. 1949. – DOI 10.3390/ijerph18041949. – EDN SRPQHY

8. Кузнецова Е.А., Климова Е.В., Шаяпова Л.В., Шуваева Е.Г., Фесенко А.Н. Производство порошка из гречневой лузги - путь к созданию безотходных высокоэффективных технологий // Зернобобовые и крупяные культуры. – 2021. – № 1(37). – С. 69-75. – DOI 10.24412/2309-348X-2021-1-69-75. – EDN ZSWIIV.

9. Давидович Е.А. Отходы пищевой промышленности – перспективное сырье для биоразлагаемых упаковочных композиций // Пищевая и перерабатывающая промышленность. Реферативный журнал. – 2010. – № 1. – С. 16. – EDN LILTHX.

10. Семухин А.С. Обоснование выбора лузги гречихи как основного ингредиента для создания биоразлагаемой упаковки для пищевых продуктов // Инновационный потенциал развития общества: взгляд молодых ученых: сборник научных статей 3-й Всероссийской научной конференции перспективных разработок: в 4 т., Курск, 01 декабря 2022 года. Том 3. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2022. – С. 240-242. – EDN HV-GQKM.

11. Чевокин А.А. Комплексная технология переработки гречихи с утилизацией лузги: специальность 05.18.01 "Технология обработки, хранения и переработки злаковых, бобовых культур, крупяных продуктов, плодоовощной продукции и виноградарства": автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Москва, 2008. – 26 с. – EDN NKMKDL.

12. Шекуров В.Н., Таренко Б.И., Шекуров К.В. Углубленная переработка шелухи гречихи // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17. – № 7. – С. 205-207. – EDN SCNLUP.

13. Клинецвич В.Н., Флорик Е.А. Способы использования лузги гречихи посевной // Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология. – 2020. – № 1(229). – С. 68-81. – EDN FDQERP.

14. Прищенко Н.А., Лим Л.А., Реутов В.А., Заболотная А.М. Разработка технологии получения лигно-целлюлозного термопластичного композиционного материала на основе полиэтилена и шелухи гречихи // Ресурсо- и энергосберегающие технологии в химической и нефтехимической промышленности: VII Международная конференция Российского химического общества имени Д.И. Менделеева, посвященная 100-летию со дня рождения Л.А. Костандова, Москва, 28 октября 2015 года / Редакционная коллегия: А.Ю. Цивадзе, Е.Г. Винокуров, Н.Р. Косинова, Н.Н. Кулов. – Москва: Общероссийская общественная организация "Российское химическое общество им. Д.И. Менделеева", 2015. – С. 171-172. – EDN UYCWEN.

15. Корпачева С.М., Чугунова О.В., Позняковский В.М. Использование порошка из лузги гречихи в рецептурах и технологии производства бисквитного полуфабриката // Индустрия питания. – 2021. – Т. 6. – № 4. – С. 55-63. – DOI 10.29141/2500-1922-2021-6-4-6. – EDN PBQCXB.

16. Язев С.Г., Левочкина Л.В., Голубева Ю.И. Использование гречневой шелухи в приготовлении бисквитов // Пищевая промышленность. – 2016. – № 5. – С. 46-48. – EDN WDFMWP.

Статья поступила в редакцию 20.11.2023

Статья принята к публикации 15.12.2023

УДК: 579.64:58.071

EDN: LBKHMFF

РОЛЬ *BACILLUS AMYLOLIQUEFACIENS* В СНИЖЕНИИ АБИОТИЧЕСКОГО СТРЕССА ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР

© Авторы 2023

SPIN: 4510-4135

AuthorID: 1137817

ORCID: 0000-0002-3044-3529

ResearcherID: AAC-1428-2022

ScopusID: 57894794800

СЕРАЗЕТДИНОВА Юлия Ренатовна, младший научный сотрудник
лаборатории фиторемедиации техногенно нарушенных экосистем

Кемеровский государственный университет

(650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, д. 6, e-mail: serazetdinova2000@mail.ru)

SPIN: 5500-7190

AuthorID: 1061968

ORCID: 0000-0002-7655-0258

ResearcherID: AAE-5403-2020

ScopusID: 57218384058

ФОТИНА Наталья Вячеславовна, младший научный сотрудник
лаборатории фиторемедиации техногенно нарушенных экосистем

Кемеровский государственный университет

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

SPIN: 4479-3384

AuthorID: 744908

ORCID: 0000-0003-4988-8197

ResearcherID: B-8192-2018

ScopusID: 57041180800

АСЯКИНА Людмила Константиновна, доктор технических наук,
заведующий лабораторией фиторемедиации техногенно нарушенных экосистем

Кемеровский государственный университет

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

SPIN: 5203-5725

AuthorID: 130915

ORCID: 0000-0002-5630-3196

ResearcherID: C-7606-2014

ScopusID: 57194498125

ПРОСЕКОВ Александр Юрьевич, доктор биологических наук, профессор,
профессор кафедры бионанотехнологии

Кемеровский государственный университет

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

SPIN: 9255-4650

AuthorID: 393631

ORCID: 0000-0002-0309-5709

ResearcherID: L-2502-2016

ScopusID: 36028520300

НЕВЕРОВА Ольга Александровна, доктор биологических наук,
директор института биологии, экологии и природных ресурсов

Кемеровский государственный университет

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

Аннотация. Абиотические стрессы оказывают серьезное влияние на продуктивность зерновых культур, и вызывают экономические потери. Для борьбы с абиотическими стрессами сельскохозяйственных культур актуально использовать ростостимулирующие микроорганизмы. В особенности перспективно применение представителей вида *Bacillus amyloliquefaciens*, которые активно применяются в сельском хозяйстве. Однако их влияние на растения в условиях засухи и засоления мало освещено. Цель работы – изучение способности *Bacillus amyloliquefaciens* В-1126 снижать негативное влияние дефицита воды и засоления на яровую мягкую пшеницу (*Triticum aestivum* L. *emend.*) и яровой овес (*Avena sativa* L.). Проведенные исследования показали, что штамм не только характеризуется устойчивостью к высоким концентрациям соли (10%) и низкому осмотическому потенциалу (-0,73 МПа), но и значительно снижает негативные воздействия засухи и засоления на исследуемые

зерновые культуры. У растений, обработанных *Bacillus amyloliquefaciens* B-1126, в условиях стресса наблюдали увеличение содержания ИУК, хлорофиллов и каротиноидов в надземной части. Это говорит о том, что обработанные растения легче перенесли абиотические стрессы. В связи с этим изучаемый штамм может активно применяться для повышения продуктивности зерновых культур в условиях засухи и засоления.

Ключевые слова: *Bacillus amyloliquefaciens*, *Triticum aestivum* L. *emend.*, *Avena sativa* L., абиотический стресс, фотосинтетические пигменты, фитогормоны.

THE ROLE OF BACILLUS AMYLOLIQUEFACIENS IN REDUCING THE ABIOTIC STRESS OF CEREALS

© The Author(s) 2023

SERAZETDINOVA Yulia Renatovna, junior researcher

laboratory of phytoremediation of technogenically disturbed ecosystems

Kemerovo State University

(650000, Russia, Kemerovo, Krasnaya 6, e-mail: serazetdinova2000@mail.ru)

FOTINA Natalya Vyacheslavovna, junior researcher

laboratory of phytoremediation of technogenically disturbed ecosystems

Kemerovo State University

(650000, Russia, Kemerovo, Krasnaya 6, e-mail: fotina.natashenka@mail.ru)

ASYAKINA Lyudmila Konstantinovna, doctor of technical sciences, professor,
head of the laboratory of phytoremediation of technogenically disturbed ecosystems

Kemerovo State University

(650000, Russia, Kemerovo, Krasnaya 6, e-mail: alk_kem@mail.ru)

PROSEKOV Aleksandr Yur'yevich, doctor of biological sciences, professor,
professor the department of Bionanotechnology

Kemerovo State University

(650000, Russia, Kemerovo, Krasnaya 6, e-mail: rector@kemsu.ru)

NEVEROVA Olga Aleksandrovna, doctor of biological sciences,
director of Institute of Biology, Ecology and Natural Resources

Kemerovo State University

(650000, Russia, Kemerovo, Krasnaya 6, e-mail: neverova@kemsu.ru)

Abstract. Abiotic stresses have a serious impact on the productivity of cereal crops and cause economic losses. To combat abiotic stress in agricultural crops, it is important to use growth-stimulating microorganisms. Particularly promising is the use of representatives of the species *Bacillus amyloliquefaciens*, which are actively used in agriculture. However, their effect on plants under conditions of drought and salinity is poorly understood. The purpose of the work is to study the ability of *Bacillus amyloliquefaciens* B-1126 to reduce the negative effects of water deficiency and salinity on spring bread wheat (*Triticum aestivum* L. *emend.*) and spring oats (*Avena sativa* L.). The conducted studies showed that the strain is not only characterized by resistance to high salt concentrations (10%) and low osmotic potential (-0.73 MPa), but also significantly reduces the negative effects of drought and salinity on the studied grain crops. In plants treated with *Bacillus amyloliquefaciens* B-1126, under stress conditions, an increase in the content of IAA, chlorophylls and carotenoids in the aerial parts was observed. This suggests that the treated plants tolerated abiotic stress more easily. In this regard, the studied strain can be actively used to increase the productivity of grain crops under conditions of drought and salinity.

Keywords: *Bacillus amyloliquefaciens*, *Triticum aestivum* L. *emend.*, *Avena sativa* L., abiotic stress, photosynthetic pigments, phytohormones.

Для цитирования: Серазетдинова Ю.Р. Роль *Bacillus amyloliquefaciens* в снижении абиотического стресса зерновых культур / Ю.Р. Серазетдинова, Н.В. Фотина, Л.К. Асякина, А.Ю. Просеков, О.А. Неверова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 12. – № 4(64). – С. 178-183. – EDN: LBKHMf.

Введение. Абиотические стрессы оказывают существенное влияние на урожайность зерновых культур и приводят к серьезным экономическим потерям повсеместно [1-5]. Среди наиболее распространенных абиотических стрессов выделяют дефицит воды и засоление. Они изменяют морфологические, физиологические, биохимические и молекулярные реакции растений, вызывая значительные потери урожая в сельском хозяйстве [6, 7]. На раннем этапе, засуха и засоление негативно

сказываются на развитии растений, приводя к замедлению их роста, нарушению процессов фотосинтеза и снижению выработки пигментов. Кроме того, активность ферментов становится менее интенсивной [8, 9].

Применение микроорганизмов, способствующих росту растений, является популярным и эффективным методом для повышения производительности и стимулирования роста сельскохозяйственных культур [10, 11]. Согласно исследо-

ваниям, микроорганизмы могут быть применены в качестве эффективного средства для снижения негативного воздействия абиотических стрессов на сельскохозяйственные культуры [12, 13]. Ключевыми механизмами, с помощью которых стимулирующие рост растений микроорганизмы улучшают рост растений в условиях стресса, являются: повышение уровня эндогенного этилена, увеличение количества фотосинтетических пигментов, стимулирование роста (за счет синтеза фитогормонов) [14].

Перспективным агентом в борьбе со стрессом зерновых культур, вызванным засухой и засолением, является *Bacillus amyloliquefaciens*. На данный момент ростостимулирующие свойства представителей вида широко изучены. Известно, что *Bacillus amyloliquefaciens* является антагонистом фитопатогенов, синтезирует фитогормоны, фиксирует атмосферный азот и солубилизует питательные фосфаты и калий [15-17]. В тоже время в отечественной литературе сведений о влиянии *Bacillus amyloliquefaciens* на злаковые культуры, подвергшиеся засухе и засолению недостаточно.

Цель работы – изучение способности бактерий *Bacillus amyloliquefaciens* B-1126 снижать негативное влияние дефицита воды и засоления на зерновые культуры, а именно овес и пшеницу.

Методология. Объектом исследования являлись: штамм *Bacillus amyloliquefaciens* B-11265, полученный из коллекции Национального биоресурсного центра «Всероссийская коллекция промышленных микроорганизмов» (БРЦ ВКПМ), яровая мягкая пшеница (*Triticum aestivum* L. emend.) и яровой овес (*Avena sativa* L.).

Определение устойчивости *Bacillus amyloliquefaciens* B-1126 к абиотическим стрессам. Солеустойчивость бактериального штамма определяли на чашках Петри на агаризованной среде Лурия-Бертани в модификации Миллера с добавлением натрия хлористого (ЛенРеактив, Россия) в различных концентрациях (0,5%, 2,5%, 5%, 7,5% и 10%). Инкубировали в течение 72 ч при температуре 28 ± 2°C. При наблюдении роста на чашке Петри штамм считался устойчивым к определенной концентрации соли [18].

Засухоустойчивость штамма определяли в агаризованной среде Лурия-Бертани в модификации Миллера с добавлением полиэтиленгликоля ПЭГ 6000 (Диа-М, Россия). Рост штамма контролировали при температуре 28 ± 2°C в течение 24 ч в чашках Петри с различным осмотическим потенциалом (-0,05, -0,15, -0,3, -0,49 и -0,73 МПа). При наблюдении роста на чашке Петри штамм считался устойчивым к определенному осмотическому потенциалу (засухе) [19].

Влияние *Bacillus amyloliquefaciens* B-1126 на рост и развитие пшеницы и овса в условиях абиотического стресса. Бактериальную суспензию готовили в стерильном физиологическом растворе с коэффициентом мутности 1,5 по Мак-Фарланду.

Семена пшеницы и овса предварительно замачивали в 5% растворе гипохлорита натрия в течение 10 мин, 5-кратно промывали стерильной дистиллированной водой и сушили в течение 2 ч в стерильных условиях ламинарного бокса («Ламинарные системы», Россия). Далее семена высаживали в горшки объемом 0,2 л с универсальным грунтом. Через 7 дней по 10 саженцев одинакового размера пересаживали в горшки объемом 1 л и подвергали различным обработкам, однако обработка бактериальным консорциумом происходила спустя 2 дня после пересадки саженцев:

- контроль;
- вариант 1: обработка суспензией *Bacillus amyloliquefaciens*;
- вариант 2: обработка 1%-ным раствором натрия хлористого (солевой стресс);
- вариант 3: обработка 10%-ным раствором ПЭГ 6000 (засуха);
- вариант 4: обработка 1%-ным раствором натрия хлористого и суспензией *Bacillus amyloliquefaciens*;
- вариант 5: обработка 10%-ным раствором ПЭГ 6000 и суспензией *Bacillus amyloliquefaciens*.

Растворы натрия хлористого, ПЭГ 6000 и суспензии *Bacillus amyloliquefaciens* вносили в горшки по 50 мл.

Растения инкубировали в климатической камере (Binder, Германия) при температуре 25°C и влажности 40%.

Чтобы исследовать влияние каждой обработки на рассаду, измеряли различные параметры роста (длина побега и длина корня). Помимо этого определяли содержание хлорофилла листьев (хлорофилл *a* и хлорофилла *b*) и каротиноидов спектрофотометрическим анализом химически экстрагированных пигментов. Для этого измельченные листья экстрагировали 80% этанолом при комнатной температуре и центрифугировали. Затем поглощение пигмента измеряли спектрофотометрически при 663, 645 и 480 нм (хлорофилл *a*, хлорофилл *b*, каротиноиды соответственно) [14]. Все вышеперечисленные показатели измеряли на 7 сутки после пересадки саженцев.

Количественное определение индолил-3-уксусной кислоты. Концентрацию индолил-3-уксусной кислоты определяли с помощью набора для иммуноферментного анализа (Olchemim, Чехия) по протоколам производителя [20].

Каждый эксперимент проводили в пятикратной повторности. Математическую обработку осуществляли с помощью пакета программ *Microsoft Office*. Статистический анализ полученных данных проводили с помощью одномоментного парного критерия Стьюдента по каждой паре интересов. Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$.

Результаты. Результаты определения солеустойчивости и засухоустойчивости представлены в таблице 1.

Как показали исследования, штамм *Bacillus amyloliquefaciens* B-1126 устойчив к высокому содержанию соли в питательной среде, а также к низкому осмотическому потенциалу (засухе).

Результаты исследования способности штамма *Bacillus amyloliquefaciens* B-1126 снижать влияние абиотических стрессов на пшеницу и овес представлены в таблице 2.

Таблица 1 – Результаты определения солеустойчивости и засухоустойчивости *Bacillus amyloliquefaciens* B-1126*

Стресс	<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> B-1126	
Содержание натрия хлористого, %	0,5	+
	2,5	+
	5,0	+
	7,5	+
	10,0	+
Осмотический потенциал, МПа	-0,05	+
	-0,15	+
	-0,30	+
	-0,49	+
	-0,73	+

* составлено автором

Таблица 2 – Результаты исследования влияния *Bacillus amyloliquefaciens* B-1126 на показатели роста зерновых культур*

Вариант обработки	Хлорофилл а, мг/г	Хлорофилл b, мг/г	Каротиноиды, мг/г	Индолил-3-уксусная кислота, мг/г
Яровая мягкая пшеница (<i>Triticum aestivum</i> L. emend.)				
Контроль	1,53±0,03	0,67±0,02	1,12±0,03	0,16±0,01
Вариант 1	1,79±0,04	0,90±0,02	1,61±0,04	0,23±0,02
Вариант 2	0,45±0,01	0,32±0,01	0,81±0,03	0,06±0,01
Вариант 3	0,31±0,01	0,24±0,01	0,68±0,02	0,03±0,01
Вариант 4	1,35±0,02	0,59±0,01	1,06±0,02	0,13±0,01
Вариант 5	1,19±0,03	0,45±0,02	0,97±0,02	0,10±0,01
Яровой овес (<i>Avena sativa</i> L.)				
Контроль	2,25±0,06	0,85±0,03	0,95±0,03	0,27±0,01
Вариант 1	2,41±0,05	1,06±0,04	1,15±0,03	0,39±0,02
Вариант 2	1,79±0,04	0,63±0,04	0,76±0,04	0,13±0,01
Вариант 3	1,54±0,04	0,53±0,03	0,62±0,02	0,09±0,01
Вариант 4	2,01±0,03	0,80±0,02	0,88±0,03	0,24±0,02
Вариант 5	1,98±0,03	0,75±0,03	0,71±0,03	0,20±0,01

* составлено автором

Обработка штаммом *Bacillus amyloliquefaciens* B-1126 благоприятно влияет на содержание фотосинтезирующих пигментов и индолил-3-уксусной кислоты в листьях пшеницы и овса как в условиях засоления, так и в условиях засушливости. Так, содержание хлорофилла а в пшенице в вариантах 4 и 5 более чем в 2,5 раза выше, содержание ИУК – более чем в 2 раза по сравнению с вариантами 2 и 3. При обработке овса штаммом *Bacillus amyloliquefaciens* B-1126 как в условиях высокого содержания соли, так и при низком содержании влаги, количество ИУК увеличилось в среднем в 2 раза, содержание хлорофилла а увеличилось на 12-28%, хлорофилла b – на 26-41%, а содержание каротиноидов – на 14-15%.

Обсуждение. Результаты, полученные в ходе нашего исследования, согласуются с данными других ученых. Так, N. Lotfi и соавторы сообщили о выделении штамма *Bacillus amyloliquefaciens*, демонстрирующего устойчивость к засухе [21]. О способности представителей вида выживать в условиях дефицита воды сообщали также S. Vardharajula и др. [22]. Солеустойчивые штаммы *Bacillus amyloliquefa-*

ciens широко освещаются в современной литературе. Например, J. Naamala и др. описали толерантность к солевому стрессу у *Bacillus amyloliquefaciens* (BA) EB2003 [23]. J. Naamala и соавторы сообщили об изменении профиля экзопротеома *Bacillus amyloliquefaciens* EB2003A при воздействии солевого стресса. Такой защитный механизм позволяет повысить устойчивость бактерии к негативному влиянию высоких концентраций соли [24].

Представители *Bacillus amyloliquefaciens* не только проявляют толерантность к засолению и засухе, но и способны повышать устойчивость растений к этим факторам. Так, *Bacillus amyloliquefaciens* SQR9 способствовал повышению устойчивости кукурузы к солевому стрессу за счет таких механизмов, как: повышение содержания растворимых сахаров, повышение активности пероксидазы и каталазы, а также снижении накопления в растении ионов натрия [25]. Штамм *Bacillus amyloliquefaciens* GB03 повышал устойчивость к высокому содержанию соли у *Arabidopsis thaliana*, а также у некоторых сельскохозяйственных

растений. Q.-Q. Nan и др. отметили, что это связано с улучшением фотосинтетической активности, снижения межклеточной концентрации CO_2 , а также снижения осмотического потенциала листьев [26].

Таким образом, представители *Bacillus amyloliquefaciens* обладают множественными механизмами, позволяющими снижать негативное воздействие абиотических стрессов на сельскохозяйственные культуры. В связи с этим использование потенциала микробно-растительных ассоциаций может стать устойчивым методом обеспечения высокой продуктивности агропромышленного комплекса в условиях засухи и солевого стресса. Перспективна также разработка комбинированных микробных препаратов, так как некоторые ученые сообщают о синергетическом эффекте при совместном применении нескольких культур бактерий и грибов [27, 28].

Выводы. Результаты исследования показали, что *Bacillus amyloliquefaciens* B-1126 обладает высокой устойчивостью к абиотическим факторам, в частности сохраняет жизнеспособность при содержании в среде 10% хлорида натрия. Штамм также выдерживает осмотический потенциал -0,73 МПа. Обработка растений *Bacillus amyloliquefaciens* B-1126 позволила снизить негативное влияние засухи и засоления на яровую мягкую пшеницу и яровой овес. Во всех случаях в надземной части растений наблюдали увеличение содержания ИУК, хлорофилла *a*, хлорофилла *b* и каротиноидов. Таким образом, применение исследуемого штамма в сельском хозяйстве может быть сосредоточено на повышении продуктивности культур в условиях абиотических стрессов. В тоже время необходимо тщательно изучить процессы воздействия микроорганизма на растения в полевых условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Daryanto S., Wang L., Jacinthe P.-A. Global synthesis of drought effects on cereal, legume, tuber and root crops production: A review // *Agricultural Water Management*. – 2017. – Vol. 179. – P. 18-33. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.04.022>.
2. Karim Md.R., Rahman M.A. Drought risk management for increased cereal production in Asian Least Developed Countries // *Weather and Climate Extremes*. – 2015. – Vol. 7. – P. 24-35. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2014.10.004>.
3. Hammami Z., Qureshi A.S., Sahli A., Gauffreteau A., Chamekh Z., Azaiez B.F.E., Ayadi S., Trifa Y. Modeling the Effects of Irrigation Water Salinity on Growth, Yield and Water Productivity of Barley in Three Contrasted Environments // *Agronomy*. – 2020. – Vol. 10(10). P. 1459. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101459>.
4. Zhang J., Zhang S., Cheng M., Jiang H., Zhang X., Peng C., Lu X., Zhang M., Jin J. Effect of Drought on Agronomic Traits of Rice and Wheat: A Meta-Analysis // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. – 2018. – Vol. 15(5). – P. 839. <https://doi.org/10.3390/ijerph15050839>.
5. Kumar P., Sahu N.C., Ansari M.A. Impact of climate change on cereal production: evidence from lower-middle-income countries // *Environ Sci Pollut Res*. – 2021. – Vol. 28. – P. 51597-51611. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14373-9>.
6. Jing Yd., He Zl., Yang, Xe. Role of soil rhizobacteria in phytoremediation of heavy metal contaminated soils // *J. Zhejiang Univ. - Sci. B*. – 2007. – Vol. 8. – P. 192-207. <https://doi.org/10.1631/jzus.2007.B0192>.
7. Khan N., Bano A., Rahman M.A., Rathinasabapathi B.,

Babar M.A. UPLC-HRMS-based untargeted metabolic profiling reveals changes in chickpea (*Cicer arietinum*) metabolome following long-term drought stress // *Plant Cell Environ*. – 2019. – Vol. 42. – P. 115-132. <https://doi.org/10.1111/pce.13195>.

8. Ali S.Z., Sandhya V., Rao L.V. Isolation and characterization of drought-tolerant ACC deaminase and exopolysaccharide-producing fluorescent *Pseudomonas* sp. // *Ann Microbiol*. – 2014. – Vol. 64. – P. 493-502. <https://doi.org/10.1007/s13213-013-0680-3>.

9. Glick B.R. Bacteria with ACC deaminase can promote plant growth and help to feed the world // *Microbiological Research*. – 2014. – Vol. 169(1). – P. 30-39. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2013.09.009>.

10. Haskett T.L., Tkacz A., Poole P.S. Engineering rhizobacteria for sustainable agriculture // *ISME J*. – 2021. – Vol. 15. – P. 949-964. <https://doi.org/10.1038/s41396-020-00835-4>.

11. Naik K., Mishra S., Srichandan H., Singh P.K., Sarangi P.K. Plant growth promoting microbes: Potential link to sustainable agriculture and environment // *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. – 2019. – Vol. 21. – P. 101326. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101326>.

12. Gupta S., Pandey S. Unravelling the biochemistry and genetics of ACC deaminase-An enzyme alleviating the biotic and abiotic stress in plants // *Plant Gene*. – 2019. – Vol. 18. – P. 100175. <https://doi.org/10.1016/j.plgene.2019.100175>.

13. Oves M., Khan M.S., Zaidi A. Biosorption of heavy metals by *Bacillus thuringiensis* strain OSM29 originating from industrial effluent contaminated north Indian soil // *Saudi Journal of Biological Sciences*. – 2013. – Vol. 20(2). – P. 121-129. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2012.11.006>.

14. Kazerooni E.A., Maharachchikumbura S.S.N., Adhikari A., Al-Sadi A.M., Kang S.-M., Kim L.-R., Lee I.-J. Rhizospheric *Bacillus amyloliquefaciens* Protects *Capsicum annuum* cv. Geumsugangsan From Multiple Abiotic Stresses via Multifarious Plant Growth-Promoting Attributes // *Front. Plant Sci*. – 2021. – Vol. 12. – P. 669693. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.669693>.

15. Shahid I., Han J., Hanoq S., Malik K.A., Borchers C.H., Mehnaz S. Profiling of Metabolites of *Bacillus* spp. and Their Application in Sustainable Plant Growth Promotion and Biocontrol // *Front. Sustain. Food Syst*. – 2021. – Vol. 5. – P. 605195. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.605195>.

16. Luo L., Zhao C., Wang E., Raza A., Yin C. *Bacillus amyloliquefaciens* as an excellent agent for biofertilizer and biocontrol in agriculture: An overview for its mechanisms // *Microbiol Res*. – 2022. – Vol. 259. – P. 127016. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2022.127016>.

17. Lu P., Jiang K., Hao Y.Q., Chu W.Y., Xu Y.D., Yang J.Y., Chen J.L., Zeng G.H., Gu Z.H., Zhao H.X. Profiles of *Bacillus* spp. Isolated from the Rhizosphere of *Suaeda glauca* and Their Potential to Promote Plant Growth and Suppress Fungal Phytopathogens // *J Microbiol Biotechnol*. – 2021. – Vol. 31(9). – P. 1231-1240. <https://doi.org/10.4014/jmb.2105.05010>.

18. Barra P.J., Inostroza N.G., Acuña J.J., Mora M.L., Crowley D.E., Jorquera M.A. Formulation of bacterial consortia from avocado (*Persea americana* Mill.) and their effect on growth, biomass and superoxide dismutase activity of wheat seedlings under salt stress // *Appl. Soil Ecol*. – 2016. – Vol. 102. – P. 80-91. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.02.014>.

19. Ali S.Z., Sandhya V., Rao L.V. Isolation and characterization of drought-tolerant ACC deaminase and exopolysaccharide-producing fluorescent *Pseudomonas* sp // *Ann. Microbiol*. – 2014. – Vol. 64. – P. 493-502. <https://doi.org/10.1007/s13213-013-0680-3>.

20. Соколова М.Г., Акимова Г.П., Вайшла О.Б. Влияние на растения фитогормонов, синтезируемых ризосферными бактериями // *Прикладная биохимия и микробиология*. – 2011. – Т. 47(3). – С. 302-307.

21. Lotfi N., Soleimani A., Çakmakçı R., Vahdati K., Mohammadi P. Characterization of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) in Persian walnut associated with drought stress tolerance // *Sci Rep*. – 2022. – Vol. 12. – P. 12725. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16852-6>.

22. Vardharajula S., Ali S.Z., Grover M., Reddy G., Bandi V. Drought-tolerant plant growth promoting *Bacillus* spp.: effect on growth, osmolytes, and antioxidant status of maize under drought stress // *Journal of Plant Interactions*. – 2011. – Vol. 6(1). – P. 1-14. <https://doi.org/10.1080/17429145.2010.535178>.

23. Naamala J., Msimbira L.A., Antar M., Subramanian S., Smith D.L. Cell-Free Supernatant Obtained From a Salt Tolerant

Bacillus amyloliquefaciens Strain Enhances Germination and Radicle Length Under NaCl Stressed and Optimal Conditions // Front. Sustain. Food Syst. – 2022. – Vol. 6. – P. 788939. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.788939>.

24. Naamala J., Subramanian S., Msimbira L.A., Smith D.L. Effect of NaCl stress on exoproteome profiles of Bacillus amyloliquefaciens EB2003A and Lactobacillus helveticus EL2006H // Front. Microbiol. – 2023. – Vol. 14. – P. 1206152. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1206152>.

25. Chen L., Liu Y., Wu G., Njeri K.V., Shen Q., Zhang N., Zhang R. Induced maize salt tolerance by rhizosphere inoculation of Bacillus amyloliquefaciens SQR9 // Physiol Plantarum. – 2016. – Vol. 158. – P. 34-44. <https://doi.org/10.1111/ppl.12441>.

26. Han Q.-Q., Wu Y.N., Gao H.J., Xu R., Paré P.W., Shi H., Zhao Q., Li H.-R., Khan S.A., Wang Y.-Q., Wang S.-M., Zhang J.-L. Improved salt tolerance of medicinal plant Codonopsis pilosula by Bacillus amyloliquefaciens GB03 // Acta Physiol Plant. – 2017. – Vol. 39. – P. 35. <https://doi.org/10.1007/s11738-016-2325-1>.

27. Sheteiwy M.S., Elgawad H.A., Xiong Y.-C., Macovei A., Brestic M., Skalicky M., Shaghaleh H., Hamoud Y.A., El-Sawah A.M. Inoculation with Bacillus amyloliquefaciens and mycorrhiza confers tolerance to drought stress and improve seed yield and quality of soybean plant // Physiologia Plantarum. – 2021. – Vol. 172(4). – P. 2153-2169. <https://doi.org/10.1111/ppl.13454>.

28. Kumar M., Mishra S., Dixit V., Kumar M., Agarwal L., Chauhan P.S., Nautiyal C.S. Synergistic effect of Pseudomonas putida and Bacillus amyloliquefaciens ameliorates drought stress in chickpea (Cicer arietinum L.) // Plant Signaling & Behavior. – 2016. – Vol. 11. – P. 1. <https://doi.org/10.1080/15592324.2015.1071004>.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Фундаментальные исследования по разработке биопестицидов, состоящих из экстремофильных и эндофитных микроорганизмов, для преодоления абиотического и биотического стресса сельскохозяйственными культурами в условиях Кемеровской области-Кузбасса» (шифр FZSR-2023-0003).

Статья поступила в редакцию 20.11.2023

Статья принята к публикации 15.12.2023

УДК 663.86.054.1

EDN: OIHHQU

К ВОПРОСУ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЛОДОВ И ЛИСТЬЕВ МАЛИНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ В СОСТАВЕ ЧАЙНОГО НАПИТКА

© Автор(ы) 2023

SPIN: 4621-3360

AuthorID: 571351

ORCID: 0000-0002-3982-9700

ResearcherID: W-6663-2018

ScopusID: 50462502800

РОЖНОВ Евгений Дмитриевич, доктор технических наук, профессор кафедры пищевой инженерии
Уральский государственный экономический университет

(620144, Россия, Екатеринбург, ул. 8 Марта/Народной Воли, 62/45, e-mail: e.d.rojnov@usue.ru)

SPIN: 2551-2375

AuthorID: 482628

ORCID: 0000-0002-9146-6951

ResearcherID: B-4318-2017

ШКОЛЬНИКОВА Марина Николаевна, доктор технических наук,
профессор кафедры технологии питания

Уральский государственный экономический университет

(620144, Россия, Екатеринбург, ул. 8 Марта/Народной Воли, 62/45)

SPIN: 5119-0169

AuthorID: 561851

ORCID: 0000-0001-6992-1201

ПАСТУШКОВА Екатерина Владимировна, доктор технических наук,
профессор кафедры управления качеством и экспертизы товаров и услуг

Уральский государственный экономический университет

(620144, Россия, Екатеринбург, ул. 8 Марта/Народной Воли, 62/45)

Аннотация. Известно, что предупредить развитие неинфекционных заболеваний возможно путем включения в рацион пищевых продуктов, богатых природными антиоксидантами. Плоды и листья малины обыкновенной относят к промышленно культивируемым культурам, способным накапливать в значительных количествах витамин С, полифенольные соединения, фолиевую кислоту и другие минорные компоненты и могут рассматриваться как источники биологически активных веществ в составе различных пищевых продуктов. Возросшая популярность чайных напитков связана с осознанным выбором потребителей продуктов питания, способных усилить и поддержать иммунитет организма к простудным заболеваниям. В настоящее время набирает популярность тренд на поддержание здорового образа жизни, что напрямую влияет на рост интереса потребителей к напиткам, которые удобно употреблять на ходу и которые дают возможность получить дополнительные полезные эффекты при употреблении, например, поддержание иммунитета. Таким образом, малина обыкновенная является достаточно интересным сырьем для производства чайных напитков, отвечающих современным запросам потребителей. Цель исследования – изучить вопросы ферментации и сушки листьев и плодов малины обыкновенной в разных условиях, а также рассмотреть возможность их использования в технологии чайных напитков. В качестве объектов исследования выступали свежие и сушеные плоды малины обыкновенной (*Rubus idaeus*) сорта Вислуха; свежий, сушеный и ферментированный сушеный лист малины того же сорта, а также образцы чайных напитков. Показано, что в малине в значительных количествах присутствуют полифенольные вещества (1274,2 мг/дм³), процианидины (187,2 мг/дм³) и витамин С – минорные компоненты сырья, обладающие высокой антиоксидантной активностью. Кроме того, в плодах малины содержатся антоцианы – группа веществ, отвечающих за цвет ягоды и продуктов ее переработки. В ферментированных листьях малины при сушке происходит увеличение содержания процианидинов. По всей вероятности, это связано с активным окислением и конденсацией мономерных флавоноидов, которая протекает при ферментации и в начальные моменты сушки. Установлено, что при проектировании технологии сушки плодов малины параметр температуры не должен превышать 60°C, время сушки составит не более чем за 12-14 часов, при этом потери витамина С составят 17,14-21,91%, что сопоставимо с общими потерями витамина С при сушке листьев малины при воздушно-тепловом способе. Разработаны с использованием профилно-дескрипторного метода проектирования пищевых продуктов рецептуры чайных напитков на основе листьев и плодов малины «Холодный чай с малиной», содержащий в своем составе 8% углеводов и «Холодный чай с малиной light» с подсластителем сукралозой в составе и не содержащий углеводов. Проведена оценка готовых напитков по органолептическим и физико-химическим показателям. Показано, что разработанные напитки содержат 20,2-22,4 мг/дм³ витамина С, что соответствует 28,8-32% от адекватного суточного потребления этого витамина.

Ключевые слова: чайный напиток, плоды и листья малины, ферментация, качество, биологически актив-

ные вещества, витамин С.

ON THE ISSUE OF USING THE FRUITS AND LEAVES OF THE COMMON RASPBERRY IN TEA DRINK

© The Authors 2023

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)

SHKOLNIKOVA Marina Nikolaevna, doctor of technical sciences,

professor of the Department of Nutrition Technology

Ural State Economic University

(620144, Russia, Ekaterinburg, 8 March/Narodnaya Volya st., 62/45)

PASTUSHKOVA Ekaterina Vladimirovna, doctor of technical sciences,

professor of the Department of Goods and Services Quality Management and Expertise,

Ural State Economic University

(620144, Russia, Ekaterinburg, 8 March/Narodnaya Volya st., 62/45)

Abstract. It is known that it is possible to prevent the development of non-infectious diseases by including foods rich in natural antioxidants in the diet. The fruits and leaves of common raspberries are classified as industrially cultivated crops capable of accumulating significant amounts of vitamin C, polyphenolic compounds, folic acid and other minor components and can be considered as sources of biologically active substances in various food products. The increased popularity of tea drinks is associated with the conscious choice of food consumers that can strengthen and support the body's immunity to colds. Currently, the trend towards maintaining a healthy lifestyle is gaining popularity, which directly affects the growing interest of consumers in drinks that are convenient to drink on the go and which provide the opportunity to obtain additional beneficial effects when consumed, for example, maintaining immunity. Thus, common raspberries are quite an interesting raw material for the production of tea drinks that meet modern consumer needs. The purpose of the study is to study the issues of fermentation and drying of common raspberry leaves and fruits under different conditions, and also to consider the possibility of their use in the technology of tea drinks. The objects of study were fresh and dried fruits of common raspberries (*Rubus idaeus*) of the Vislukha variety; fresh, dried and fermented dried raspberry leaves of the same variety, as well as samples of tea drinks. It has been shown that raspberries contain significant quantities of polyphenolic substances (1274.2 mg/dm³), procyanidins (187.2 mg/dm³) and vitamin C - minor components of the raw material with high antioxidant activity. In addition, raspberry fruits contain anthocyanins - a group of substances responsible for the color of the berry and its processed products. In fermented raspberry leaves, when dried, the content of procyanidins increases. In all likelihood, this is due to active oxidation and condensation of monomeric flavonoids, which occurs during fermentation and at the initial moments of drying. It has been established that when designing a technology for drying raspberry fruits, the temperature parameter should not exceed 60°C, the drying time will be no more than 12-14 hours, and the loss of vitamin C will be 17.14-21.91%, which is comparable to the total losses vitamin C when drying raspberry leaves using the air-shade method. Developed using the profile-descriptive method of designing food products, recipes for tea drinks based on raspberry leaves and fruits "Iced tea with raspberries", containing 8% carbohydrates and "Iced tea with raspberries light" with a sucralose sweetener and containing no carbohydrates. The finished drinks were assessed according to organoleptic and physico-chemical indicators. It was shown that the developed drinks contain 20.2-22.4 mg/dm³ of vitamin C, which corresponds to 28.8-32% of the adequate daily intake of this vitamin.

Key words: tea drink, raspberry fruits and leaves, fermentation, quality, biologically active substances, vitamin C.

Для цитирования: Рожнов Е.Д. К вопросу использования плодов и листьев малины обыкновенной в составе чайного напитка/ Е.Д. Рожнов, М.Н. Школьникова, Е.В. Пастушкова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 12. – № 4(64). – С. 184-194. – EDN: OIHHQU.

Введение. Одной из серьезных проблем современности является снижение уровня обеспечения населения эссенциальными биологически активными веществами (БАВ), в том числе антиоксидантного ряда, что выступает одной из причин увеличения числа неинфекционных заболеваний. Известно, что предупредить развитие неинфекционных заболеваний возможно путем включения в рацион пищевых продуктов, богатых природными антиоксидантами [1-3].

Плоды малины обыкновенной относят к про-

мышленно культивируемым культурам, способным накапливать в значительных количествах витамин С, полифенольные соединения, фолиевую кислоту [4, 5]. Плоды малины способны накапливать до 40 мг/100г витамина С, что при норме потребления равной 60 мг/сутки [6] употребление 100г плодов способно удовлетворить до 67% необходимого количества этого витамина.

Селекционная работа по выведению сортовой малины на территории Большого Алтая была начата в 1935 г. При этом в качестве основы для селекции

были использованы дикие виды, сорта и отборные формы 8 видов малины: *Rubus idaeus subs. vulgatus* (европейская красная малина), *Rubus idaeus subs. strigosus* (американская щетинистая малина), *Rubus idaeus subs. melanolasius* (малина дальневосточная), *Rubus Komarovii Nakai* (малина Комарова), *Rubus occidentalis L.* (ежевикообразная (черная) малина), *Rubus odoratus* (малина душистая), *Rubus crataegifolius Bge* (малина боярышничколистная) и *Rubus negletus* (малина прекрасная – гибрид черной и красной малины). В 1963-1964 году в государственное сортоиспытание было передано первые 3 сорта малины. В настоящее время в Алтайском крае выведено 46 сортов малины [4].

Плоды малины широко используются в пищевой промышленности для производства сиропов, джема, варенья, соков, сиропов, ликеров [7], винодельческой продукции [8] и дистиллятов [9]. Также плоды и листья малины используют в медицине при приготовлении лечебных сиропов [10], отваров и настоев, обладающих потогонным, жаропонижающим, спазмолитическим, противовоспалительным, противогрибковым и витаминным действием [11].

Считается, что плоды малины являются одними из самых богатых источников полифенолов среди других плодов [12]. Основное количество полифенолов малины составляют антоцианы и эллаготаннины, содержание которых может достигать 90% от общего количества полифенолов [13]. Преобладающими антоцианами малины являются цианидин-3-софорозид и цианидин-3-(2G)-глюкозилрутинозид, обнаружены также цианидин-3-глюкозид, цианидин-3-рутинозид, пеларгонидин-3-софорозид, пеларгонидин-3-(2G)-глюкозилрутинозид и пеларгонидин-3-глюкозид [14]. Как отмечено в работе [15] содержание антоцианов в плодах малины значительно варьирует в зависимости от сорта, генотипа и длительности вегетационного периода. Так, более поздние сорта малины содержат антоцианов больше, по сравнению с ранними сортами [16].

В листьях малины обнаружен широкий перечень биологически активных веществ: флавоноиды, дубильные и пектиновые вещества, кумарины, фенолглюкозиды, фенолкарбоновые кислоты, катехины, лактоны, аскорбиновая кислота, витамины группы B, витамин E, некоторые алкалоиды [17].

Пандемия коронавируса SARS-CoV-2 привела к существенным изменениям на рынке продуктов питания. В частности, по данным пресс-службы торговой сети «Ашан» во время и после самоизоляции был отмечен резкий рост спроса на чай (более 26%). Однако, кроме роста рынка традиционных видов чая (как черного, так и зеленого), существенно возросли продажи чайных напитков на основе лекарственно-технического и плодово-ягодного сырья (более чем на 9,2%) [18].

Возросшая популярность чайных напитков связана с осознанным выбором потребителей продуктов питания, способных усилить и поддержать

иммунитет организма к простудным заболеваниям. При этом, как отмечают специалисты, последующий рост рынка чайных напитков возможен только за счет качественных показателей, поскольку количественный рост уже невозможен. На рынке присутствует огромное количество наименований чайных напитков в различных ценовых категориях.

В настоящее время чайные напитки воспринимаются как более дорогой продукт за счет недостаточного количества сырьевых компонентов, поэтому такие чаи не могут быть дешевле привычного зеленого и черного чая.

Набирает популярность тренд на поддержание здорового образа жизни, что напрямую влияет на рост интереса потребителей к напиткам, которые удобно употреблять на ходу и которые дают возможность получить дополнительные полезные эффекты при употреблении, например, поддержание иммунитета.

Вторым фактором развития рынка чайных напитков является функциональность напитка, т.е. содержание одного или нескольких компонентов состава в количестве более 15% от суточной нормы потребления. Примером таких напитков могут выступать, напитки, дополнительно обогащенные витамином C или напитки, приготовленные с использованием так называемых супер-фруктов.

Третьим фактором развития рынка чайных напитков является тренд на так называемую чистую этикетку и органическое происхождение продукта. Использование в составе напитка натуральных компонентов, выращенных на территориях, имеющих экологическую сертификацию, делает данный сегмент напитков достаточно интересным с точки зрения позиционирования на рынке. В связи с этим актуальность заключается в исследовании местного растительного сырья – плодов и листьев малины и разработке с их использованием полуфабрикатов для производства чайных напитков.

Таким образом, малина обыкновенная является достаточно интересным сырьем для производства чайных напитков, отвечающих современным запросам потребителей.

Цель работы – изучить вопросы ферментации и сушки листьев и плодов малины обыкновенной в разных условиях, а также рассмотреть возможность их использования в технологии чайных напитков.

Методология. На разных этапах работы в качестве объектов исследования выступали свежие и сушеные плоды малины обыкновенной (*Rubus idaeus*) сорта Вислуха; свежий, сушеный и ферментированный сушеный лист малины того же сорта, а также образцы чайных напитков. Выбор сырья для исследований обусловлен широкой распространенностью данного сорта на территории Алтайского края, Новосибирской, Кемеровской, Томской, Иркутской областях, Красноярского края и Бурятии. Сорт отличается стабильно высокой урожайностью (до 7 ц/га), высокой зимостойкостью и засухоустойчивостью [4]. Дизайн исследования представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Дизайн исследования

Определение физико-химических показателей объектов исследования производили с использованием следующих стандартных методов: массовую долю растворимых сухих веществ в свежих плодах малины, влажность сушеных плодов, листьев малины и ферментированных листьев малины определяли с использованием метода, изложенного в ГОСТ 28561-90 Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения сухих веществ или влаги; массовую концентрацию сахаров свежих плодах малины определяли с использованием метода, изложенного в ГОСТ 8756.13-87 Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения сахаров; массовую концентрацию титруемых кислот в свежих плодах малины определяли с использованием метода, изложенного в ГОСТ 32114-2013 Продукция алкогольная и сырье для ее производства. Методы определения массовой концентрации титруемых кислот; массовую концентрацию аскорбиновой кислоты в плодах и листьях малины определяли в соответствии с титриметрическим методом, изложенным в ГОСТ 24556-89 Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения витамина С; массовую концентрацию антоцианов определяли *pH*-дифференциальным методом по ГОСТ 32709-2014 Продукция соковая. Методы определения антоцианов. Кроме того, при использовались следующие методы, не являющиеся стандартизированными: массовую концентрацию полифенольных соединений (в пересчете на галловую кислоту) определяли колориметрическим методом, который основан

на способности фенольных веществ сула и вина восстанавливать фосфорно-вольфрамовую и фосфорно-молибденовую кислоты, входящие в состав реактива Фолина-Чокальтеу, до окислов вольфрама и молибдена, окрашенных в синий цвет, интенсивность окраски которого замеряют колориметрически [19]; массовую концентрацию процианидинов определяли методом, основанным на образовании окрашенных соединений при контакте процианидинов с лейкоантоциановым реактивом (бутанол:соляная кислота 4:1) при нагревании с последующей регистрацией интенсивности окраски при помощи сканирующего двухлучевого спектрофотометра *Shimadzu UV1800*.

Сушку листьев проводили воздушно-теньевым способом в проветриваемом помещении без доступа солнечного света при температуре $22 \pm 2^\circ\text{C}$ в течение 10 суток. По окончании сушки лист малины представлял собой сухую массу темно-зеленого цвета с лицевой стороны, структура листа легко разрушалась при надавливании и перетирании между пальцами. Для ферментации листья малины скручивались вручную до выделения сока, плотно укладывали в герметичную емкость и осуществляли ферментацию при 37°C в течение 3, 6 и 9 часов, затем осуществляли инактивацию ферментов кратковременной обработкой высокой температурой (100°C) и высушивали аналогично свежим листьям. Плоды малины высушивали в бытовой сушилке Ротор Дива СШ-007 при температуре 50, 60 и 70°C до конечной влажности 5%. Ферментации плоды малины не подвергались.

В качестве основы для составления композиции для получения чайного напитка выбраны листья и стебли кипрея узколистного – популярного сырьевого компонента различных композиций чайных напитков и максимально приближенного по вкусовым характеристикам настоя к чаю. На начальном этапе проектирования композиции был применен дискрипторно-профильный метод проектирования пищевых продуктов.

Для объективной и достоверной оценки результатов исследований были использованы методы математической статистики обработки данных с применением программных продуктов *Microsoft Office Excel 2019, Statistica 6.0*.

Результаты и их обсуждение. Исследование биологически активных веществ в плодах малины проводили в свежевыжатом соке, без предварительной обработки плодов ферментами для увеличе-

ния сокоотдачи. Для определения физико-химических исследований листьев малины использовали свежеобработанные образцы без предварительной обработки. В таблице 1 представлено усредненное содержание биологически активных веществ в соке малины и листьях.

Показано, что в малине в значительных количествах присутствуют полифенольные вещества (1274,2 мг/дм³), процианидины (187,2 мг/дм³) и витамин С – минорные компоненты сырья, обладающие высокой антиоксидантной активностью. Кроме того, в плодах малины содержатся антоцианы – группа веществ, отвечающих за цвет ягоды и продуктов ее переработки.

На рисунке 2 показана динамика влажности листа малины при сушке воздушно-теневым способом, а также динамика содержания полифенольных веществ и процианидинов.

Таблица 1 – Состав биологически активных веществ плодов малины (M±m, n=3)

Показатель состава	Свежий лист малины		Свежие плоды малины	
	абсолютное содержание	содержание на а.с.в., %	абсолютное содержание	содержание на а.с.в., %
М.д. сухих веществ, %	22,8±1,1	100,00	12,2±0,6	100,00
М.к. сахаров, г/дм ³	-	-	87,2±3,4	71,47
М.к. титруемых кислот (на лимонную кислоту), г/дм ³	-	-	14,9±0,4	12,21
М.к. полифенолов (на галловую кислоту), мг/дм ³	-	-	1274,2±16,7	1,04
М.к. процианидинов, мг/дм ³	-	-	187,2±9,6	0,15
М.к. антоцианов, мг/дм ³	-	-	597,6±27,4	0,49
М.к. витамина С, мг/100 г	52,8±1,4	0,23	26,7±0,9	0,21

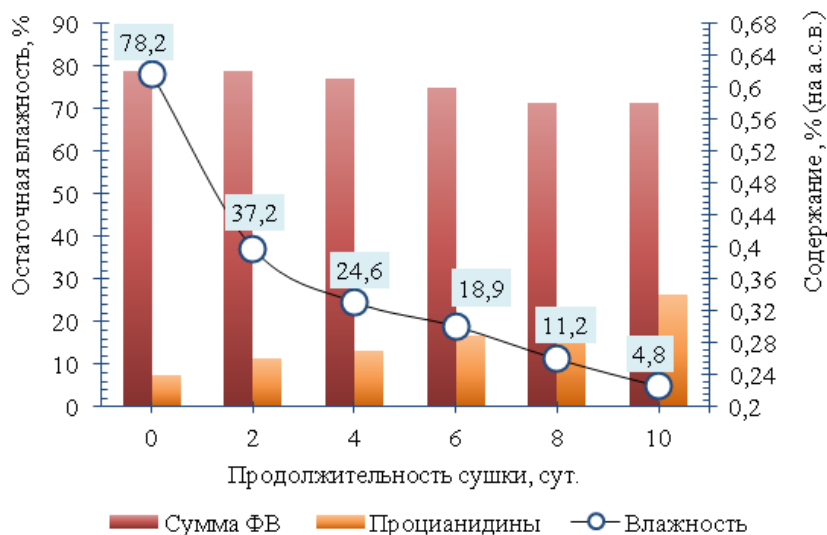


Рисунок 2 – Динамика влажности, содержания суммы фенольных веществ и процианидинов при сушке листа малины воздушно-теневым способом, %

Результаты исследований, представленные на рисунке 2, свидетельствуют, что необходимая влажность сырья в 5% достигается на десятые сутки сушки, в тоже время отмечается незначительное снижение содержания суммы фенольных веществ (ФВ).

В течении сушки наблюдалось увеличение содержания процианидинов, что обусловлено продолжительностью биохимических процессов конденсации мономерных флавоноидов. Этот факт

можно отнести к положительным, поскольку процианидины в значительной степени отвечают за вкусовое сложение напитков и продуктов питания придавая им терпкость и насыщенность вкуса.

На рисунке 3 показана динамика содержания витамина С в листьях малины при сушке воздушно-теневым способом.

Динамика содержания витамина С, представленная на рисунке 3 свидет, что при сушке воздушно-

теневым способом содержание витамина С равномерно снижается. Общее снижение количества витамина С к окончанию сушки составило 20,43% от исходного содержания в свежих листьях малины.

На рисунке 4 показано изменение содержания процианидинов после ферментации листа малины с последующей сушкой.

Таким образом, в ферментированных листьях малины при сушке происходит увеличение содержания процианидинов. По всей вероятности, это связано с активным окислением и конденсацией мономерных флавоноидов, которая протекает при ферментации и в начальные моменты сушки. Так

при ферментации листа малины в течение 3-х часов содержание процианидинов в сушеном листе увеличивается на 21,2%, при ферментации в течение 6-ти часов – на 24,3%, а при ферментации в течение 9-ти часов – на 29,3%.

Таким образом, можно принять к внедрению в дальнейшую технологию продолжительность ферментации равную 9-ти часам с последующей воздушно-теневогой сушкой ферментированного листа малины.

На рисунке 5 показана динамика содержания витамина С при сушке ферментированного листа малины в оптимальных условиях опыта.

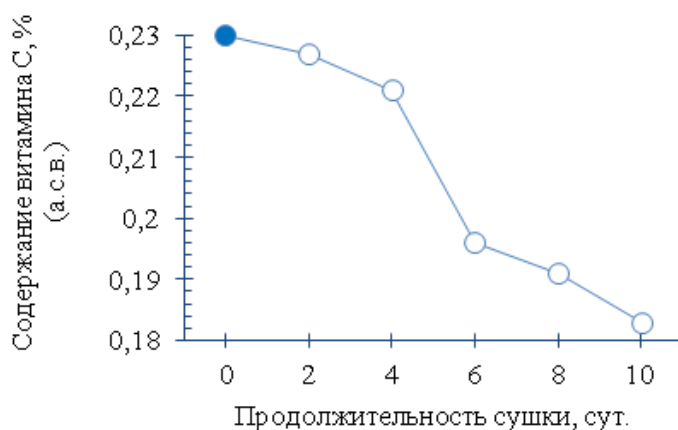


Рисунок 3 – Динамика содержания витамина С при сушке листьев малины, %

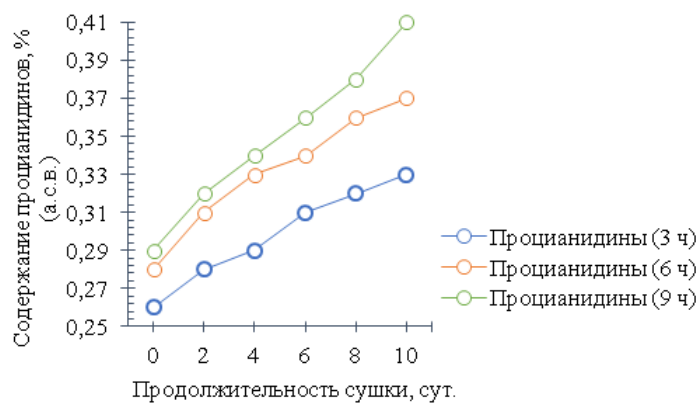


Рисунок 4 – Динамика содержания процианидинов при ферментации и сушке чайного листа

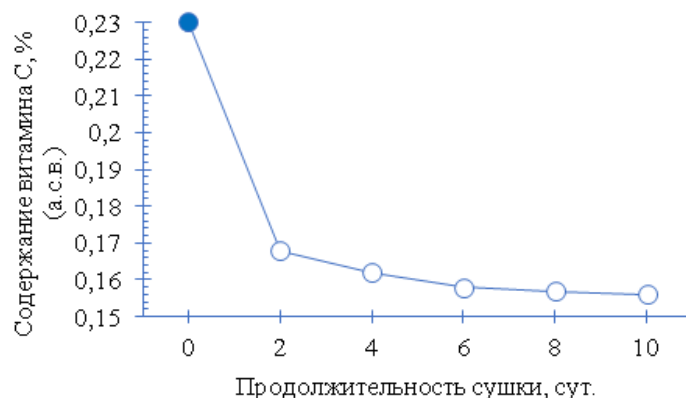


Рисунок 5 – Динамика содержания витамина С при воздушно-теневогой сушке ферментированного в течение 9-ти часов листа малины

Можно видеть, что в первые двое суток протекает резкое снижение содержания витамина С, обусловленное его окислением и температурной дегградацией в результате инактивации ферментов при 100°C. Суммарное снижение содержания витамина С в этом опыте составило 32,17%.

При сушке плодов малины в качестве контролируемых показателей было выбрано содержание антоцианов, а также витамина С. Необходимость контроля антоцианов связана с изменением цвета продуктов при сушке, а также с тем, что антоцианы малины потенциально будут в значительной мере влиять на качество чайного напитка. На рисунке 5 представлена динамика содержания антоцианов при сушке подогретым воздухом в сушилке (на рисунке цветом отмечено время достижения плодами малины остаточной влажности не более 5%). Так при сушке при 50°C необходимое время для достижения этого значения составляет 18 часов, при этом происходит плавное увеличение содержания антоцианов, обусловленное созданием более кислых условий, провоцирующих переход неокрашенных лейкоантоцианидинов в окрашенные формы.

При сушке плодов малины при 60°C отмечено, что в течение первых 12 часов сушки наблюдается увеличение содержания антоцианов, затем проис-

ходит их частичное разрушение, в том числе за счет конденсации.

Аналогичные процессы наблюдаются и при температуре 70°C, с той лишь разницей, что разрушение антоцианов начинает происходить уже после 6-ти часов сушки.

На рисунках 6, 7 показана динамика содержания витамина С при сушке плодов малины при 60°C.

Установлено, что при проектировании технологии сушки плодов малины параметр температуры не должен превышать 60°C, время сушки составит не более чем за 12-14 часов, при этом потери витамина С составят 17,14-21,91%, что сопоставимо с общими потерями витамина С при сушке листьев малины при воздушно-теновом способе.

На этапе разработки рецептуры чайного напитка дескрипторно-профильным методом для фокус-дегустации были выбраны 5 образцов холодного чая с фруктово-ягодными вкусами, реализуемых в торговых сетях города Бийска. Результаты исследования приведены в таблице 2.

На основании рекомендаций к использованию профильно-дескрипторного метода проектирования пищевых продуктов, представленных в [20] была разработана панель дескрипторов «идеального» холодного чая (табл. 3).

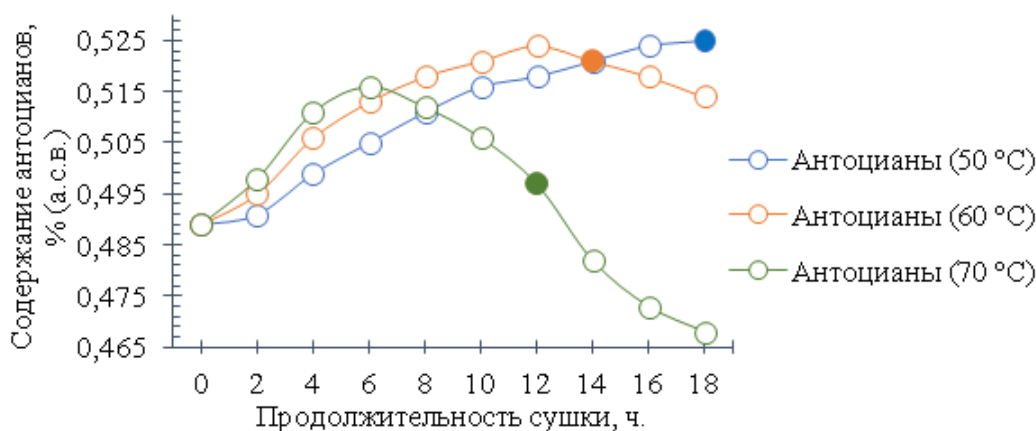


Рисунок 6 – Динамика содержания антоцианов при сушке плодов малины

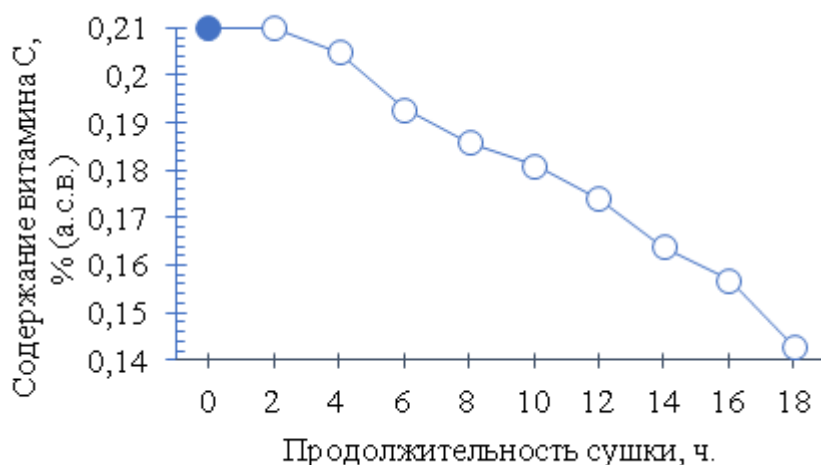


Рисунок 7 – Динамика содержания антоцианов плодов малины при сушке в различных температурных условиях

Таблица 2 – Результаты органолептической оценки образцов холодного чая

Оцениваемый признак	К _{знач.} *	Образец холодного чая				
		№1	№2	№3	№4	№5
Внешний вид:						
цвет	3,0	4,5	5,0	5,0	5,0	5,0
прозрачность	1,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Вкус:						
сладость	4,0	5,0	5,0	4,5	4,5	3,0
кислотность	5,0	4,0	5,0	4,0	3,5	3,0
терпкость	2,0	3,5	1,5	3,1	1,5	0,5
насыщенность	4,0	2,0	3,0	2,0	2,0	1,0
фруктового сырья	5,0	3,4	4,0	2,0	3,5	1,6
Аромат:						
чая	2,0	2,0	3,0	2,2	1,0	3,0
фруктового сырья	5,0	3,0	4,1	3,5	4,0	2,0
нота свежести	4,0	2,2	5,0	4,1	2,0	1,0
интенсивность аромата	3,0	2,0	5,0	3,0	4,0	2,2
насыщенность аромата	3,0	3,5	5,0	3,6	4,0	2,0
Эмоциональное восприятие:						
освежающий эффект	5,0	3,0	5,0	4,5	3,8	2,5
полезность	4,0	2,0	3,2	2,9	1,8	1,0
качество утоления жажды	2,0	4,0	5,0	4,6	2,1	2,0
Итоговая оценка	–	155,3	209,8	172,8	156,4	107,8

* Для определения коэффициентов значимости каждому дегустатору предлагалось отметить на шкале степень значимости выбранного дескриптора, выбирая значение от 1 до 10, визуализируя таким образом характеристики напитка, который он считает для себя идеальным (количество дегустаторов – 20 человек)

Таблица 3 – Разработанная панель дескрипторов

Дескриптор	К _{знач.}	Дескриптор	К _{знач.}
Цвет напитка	3,0	Аромат фруктового сырья	5,0
Сладкий вкус	4,0	Свежий аромат	4,0
Кислый вкус	5,0	Насыщенность аромата	3,0
Вкус фруктового сырья	5,0	Освежающий эффект	5,0
Насыщенность вкуса	4,0	Полезность	4,0

Далее дегустаторам было предложено сформировать образ «идеального» холодного чая с использованием панели дескрипторов, результатом стал портрет «идеального» холодного чая по мнению. Согласно мнению дегустаторов, чайный напиток типа «Холодный чай» должен иметь выраженный цвет, кисло-сладкий вкус фруктового сырья с выраженным свежим ароматом, а также обладать освежающим эффектом. При этом насыщенность аромата и вкуса сырья должны быть умеренно-выраженными, поскольку избыточная ароматичность может свидетельствовать об использовании химических композиций ароматизаторов.

Следующий этап исследований был посвящен

отработке рецептуры чайного напитка. Настой растительного сырья получали следующим образом: смешанное растительное сырьё (листья кипрея узколистного, ферментированные листья малины и сушеные плоды малины) заливали горячей водой с температурой $95 \pm 2^\circ\text{C}$ при гидромодуле 1:100. В таблице 4 приведены соотношения растительного сырья для получения настоев.

После залива настоя выдерживали при постоянной температуре в течение часа, а затем отфильтровывали жидкую фазу и исследовали органолептические характеристики.

Результаты исследования представлены в таблице 5.

Таблица 4 – Состав растительного сырья для получения настоев (в %)

Образец	Лист кипрея узколистного	Лист малины ферментированный	Плоды малины сушеные
Состав №1	50,0	10,0	40,0
Состав №2	50,0	20,0	30,0
Состав №3	50,0	25,0	25,0
Состав №4	50,0	30,0	20,0
Состав №5	50,0	40,0	10,0

Таблица 5 – Органолептические характеристики настоев растительного сырья

Образец	Органолептический показатель		
	Внешний вид	Вкус	Аромат
Состав №1	Светло коричневая жидкость с грязно красным подтоном	Кисло-терпкий, выраженный вкус ягод малины	Приятный, травянистый с выраженным ароматом малины
Состав №2			Приятный, травянистый с ароматом малины
Состав №3	Светло коричневая жидкость со слабым грязно красным подтоном	Кисло-терпкий, умеренный вкус ягод малины	Приятный, травянистый с ароматом малины
Состав №4	Светло коричневая жидкость с зеленоватым подтоном	Терпкий, умеренный вкус ягод малины	Травянистый со слабым ароматом малины
Состав №5		Терпкий, травянистый выраженный вкус ягод малины	Травянистый, со слабым ароматом малины

В результате исследований было установлено, что наилучшими органолептическими характеристиками обладает настой сырья, полученный из состава №3, поэтому в дальнейших исследованиях его использовали для разработки рецептуры напитка.

Поскольку конечный продукт должен представлять собой напиток, обладающий сладким вкусом,

необходимо было рассмотреть влияние инвертного сахарного сиропа и интенсивного подсластителя сукралозы на органолептические свойства напитка. Подслащивающие материалы вносили в напиток из расчета сладости эквивалентной сахарозе в количестве 80 г/дм³. Результаты определения органолептических свойств напитков представлены на рисунках 8 и 9.

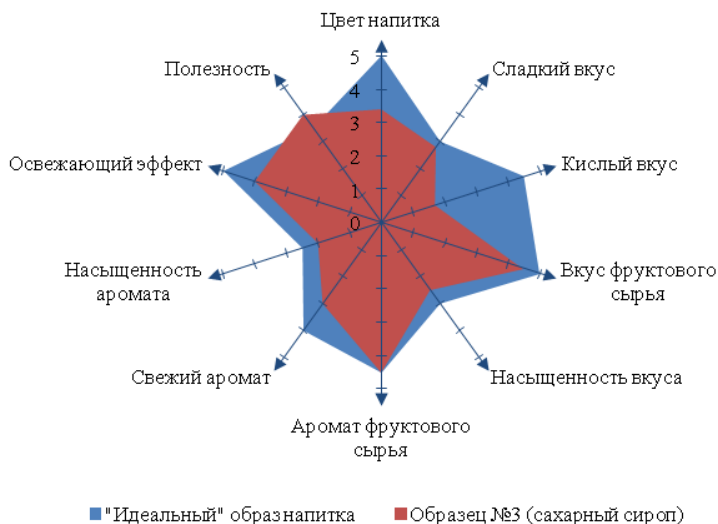


Рисунок 8 – Профилограмма органолептических свойств образца холодного чая с инвертным сахарным сиропом

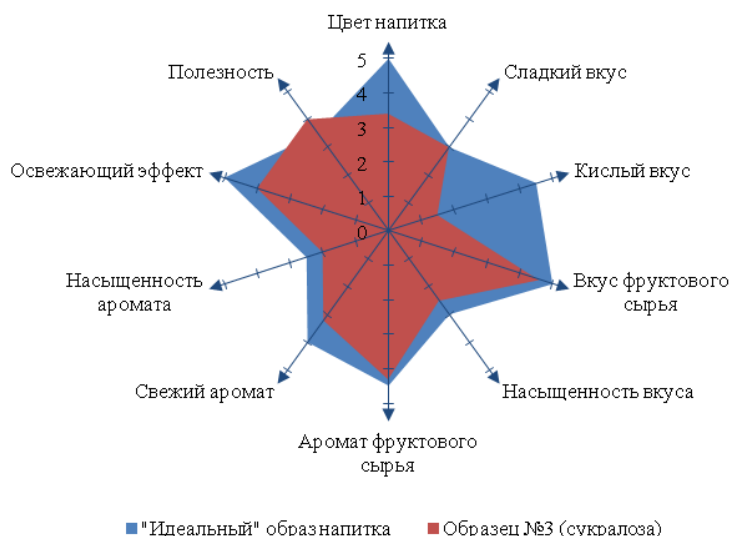


Рисунок 9 – Профилограмма органолептических свойств образца холодного чая с интенсивным сахарозаменителем сукралозой

Можно видеть, что органолептические профили напитков, приготовленных с использованием инвертного сахарного сиропа и сукралозы являются идентичными, наблюдаются лишь незначительные различия в восприятии сладкого вкуса напитка, это объясняется тем, что сукралоза получается химическим синтезом из обычного сахара и имеет

вкусовые характеристики подобные сахару.

Для исправления недостатка кислого вкуса в купаж напитка вносили лимонную кислоту в количестве 1,75 г/дм³.

Качественные показатели напитков, приготовленных по разработанным рецептурам представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Показатели качества разработанных напитков

Показатель	Холодный чай с малиной	Холодный чай с малиной light
Массовая концентрация титруемых кислот, в пересчете на лимонную, г/дм ³	1,76	1,77
Массовая концентрация сахаров, г/дм ³	82,6	6,5
Массовая концентрация фенольных веществ, мг/дм ³	289,6	301,2
Массовая концентрация антоцианов, мг/дм ³	165,2	169,1
Массовая концентрация процианидинов, мг/дм ³	98,2	101,3
Массовая концентрация аскорбиновой кислоты, мг/дм ³	20,2	22,4

Выводы. Исследованы основные физико-химические показатели сырья. Доказано, что в малине в значительных количествах присутствуют полифенольные вещества (1,04% на а.с.в), процианидины (0,15% на а.с.в.) и витамин С (0,21% на а.с.в.) – минорные компоненты сырья, обладающие высокой антиоксидантной активностью. Кроме того, в плодах малины содержатся антоцианы – группа веществ, отвечающих за цвет ягоды и продуктов ее переработки.

Изучена динамика БАВ листьев и плодов малины при переработке в полуфабрикаты для производства чайных напитков. Установлено, что при сушке листа воздушно-теневым способом содержание процианидинов накапливается за счет биохимических процессов конденсации мономерных флавоноидов, потери витамина С при таком способе переработки составляют 20,43%. Установлено, что оптимальной продолжительностью ферментации листа малины является 9 ч, это приводит к увеличению содержания процианидинов в сырье на 20,93 %, потери витамина С при этом – 32,17%. Определено, что температура сушки плодов малины должна быть не выше 60 °С, это позволяет проводить сушку не более чем за 12-14 часов, при этом потери витамина С составят 17,14-21,91%;

Разработаны с использованием профильно-дескрипторного метода проектирования пищевых продуктов рецептуры чайных напитков на основе листьев и плодов малины «Холодный чай с малиной», содержащий в своем составе 8% углеводов и «Холодный чай с малиной light» с подсластителем сукралозой в составе и не содержащий углеводов;

Проведена оценка готовых напитков по органолептическим и физико-химическим показателям. Показано, что разработанные напитки содержат 20,2-22,4 мг/дм³ витамина С, что соответствует 28,8-32% от адекватного суточного потребления этого витамина.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Lourenço S.C., Moldão-Martins M., Alves V.D. Antioxidants of natural plant origins: From sources to food industry applications //Molecules. – 2019. – Vol. 24. – №. 22. – Article: 4132.
2. Loi M., Paciolla C. Plant antioxidants for food safety and quality: exploring new trends of research //Antioxidants. – 2021. – Vol. 10. – №. 6. – Article: 972.
3. Amarowicz R., Pegg R. B. Natural antioxidants of plant origin //Advances in food and nutrition research. – Academic Press, 2019. – Vol. 90. – P. 1-81.
4. Помология. Сибирские сорта плодовых и ягодных культур XX столетия [Текст] / под ред. И.П. Калининой. – Новосибирск: ООО «Юпитер», 2005. – 568 с.
5. Жбанова Е.В., Ознобкина Е.И. Оценка сортового фонда малины по биохимическому составу плодов в различных регионах // Плодоводство. – 2014. – С. 443-451.
6. 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.)
7. Жбанова Е.В. Плоды малины *Rubus idaeus* L. как источник функциональных ингредиентов // Техника и технология пищевых производств. – 2018. – Т. 48. – №. 1. – С. 5-14.
8. Назарова Н.Е. и др. Качество и биологическая ценность вина из ягод крыжовника, малины и черной смородины с использованием растительного сахарозаменителя //Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2019. – Т. 81. – №. 4 (82). – С. 131-137.
9. Дубинина Е.В., Осипова В.П., Трофимченко В.А. Влияние способа подготовки сырья на состав летучих компонентов и выход дистиллятов из малины //Пиво и напитки. – 2018. – №. 1. – С. 30-34.
10. Гаврилова Н.Б., Чернопольская Н.Л., Вотинцев Б.П. Перспективные технологии творожного продукта для специализированного (спортивного) питания //Современное состояние, перспективы развития АПК и производства специализированных продуктов питания. – 2020. – С. 324-327.
11. Савков И.А., Хишова О.М. Фармацевтическая разработка состава и технологии получения лекарственных средств на основе сухого экстракта листьев малины обыкновенной //Вестник фармации. – 2021. – №. 4 (94). – С. 85-92.
12. Nardini M., Garaguso I. Characterization of bioactive compounds and antioxidant activity of fruit beers //Food chemis-

try. – 2020. – Vol. 305. – Article: 125437.

13. McDougall G., Martinussen I., Stewart D. Towards fruitful metabolomics: high throughput analyses of polyphenol composition in berries using direct infusion mass spectrometry //Journal of Chromatography B. – 2008. – Vol. 871. – №. 2. – P. 362-369.

14. Mullen W., Lean M.E.J., Crozier A. Rapid characterization of anthocyanins in red raspberry fruit by high-performance liquid chromatography coupled to single quadrupole mass spectrometry //Journal of Chromatography A. – 2002. – Vol. 966. – №. 1-2. – P. 63-70.

15. Beekwilder J. et al. Antioxidants in raspberry: on-line analysis links antioxidant activity to a diversity of individual metabolites //Journal of agricultural and food chemistry. – 2005. – Vol. 53. – №. 9. – P. 3313-3320.

16. Yang J. et al. Evaluation of physicochemical properties in three raspberries (*Rubus idaeus*) at five ripening stages in northern China //Scientia Horticulturae. – 2020. – Vol. 263. – Article: 109146.

17. Савков И.А., Хишова О.М. Технология получения сухого экстракта листьев малины обыкновенной //Вестник фармации. – 2020. – №. 4 (90). – С. 59-64.

18. Чайный бум. Как пандемия повлияла на рост рынка травяных напитков. – Режим доступа: <https://snob.ru/entry/237369/>

19. Гержикова, В.Г. Методы техникохимического контроля в виноделии. – Изд. 2-е / В.Г. Гержикова. – Симферополь: «Таврида», 2009. – 304 с.

20. Чугунова О.В., Заворохина Н.В. Использование методов дегустационного анализа при моделировании рецептур пищевых продуктов с заданными потребительскими свойствами // Екатеринбург: Изд-во Урал. гос. экон. ун-та. – 2010. – 148 с.

Статья поступила в редакцию 21.08.2023

Статья принята к публикации 15.12.2023

УДК 614.849
EDN: BPSTVP

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
И ПОВРЕЖДЕННОСТИ МЕТАЛЛА ОБОРУДОВАНИЯ ПОЖАРООПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ
НЕФТЕГАЗОВОГО ПРОИЗВОДСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ДИНАМИЧЕСКОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ**

© Автор(ы) 2023
SPIN: 6730-2607
AuthorID: 270797
ORCID: 0000-0001-7493-6803
ResearcherID: ААО-4611-2021
ScopusID: 56974096100

БАШИРОВ Мусса Гумерович, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий»
Уфимский государственный нефтяной технический университет
(453250, г. Салават, ул. Губкина, д. 22 Б, Башкортостан, Россия, e-mail: eapp@yandex.ru)

SPIN: 6316-8971
AuthorID: 270832
ORCID: 0000-0003-1505-9139
ResearcherID: ННМ-4640-2022
ScopusID: 57208754388

БАШИРОВА Эльмира Муссаевна, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий»
Уфимский государственный нефтяной технический университет

(453250, г. Салават, ул. Губкина, д. 22 Б, Башкортостан, Россия, e-mail: bashirova-elmira@yandex.ru)

SPIN: 3124-8613
AuthorID: 756966
ORCID: 0000-0002-5044-4596
ResearcherID: O-8322-2017
ScopusID: 57195317250

ЮСУПОВА Ильвина Гамировна, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий»
Уфимский государственный нефтяной технический университет

(453250, г. Салават, ул. Губкина, д. 22 Б, Башкортостан, Россия, e-mail: ilvina011@mail.ru)

SPIN: 9465-4633
AuthorID: 1119024
ORCID: 0000-0002-2174-8216
ResearcherID: HGU-4076-2022

АКЧУРИН Дамир Шамилевич, аспирант очной формы обучения,
ассистент кафедры «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий»
Уфимский государственный нефтяной технический университет

(453250, г. Салават, ул. Губкина, д. 22 Б, Башкортостан, Россия, e-mail: akihiro177@mail.ru)

Аннотация. Причинами аварий на предприятиях нефтегазового производства, часто сопровождающихся пожарами, являются разгерметизация и разрушение оборудования из-за превышения допустимых нагрузок в местах концентрации механических напряжений, ослабленных коррозионным и другими повреждениями. Для предотвращения разрушения оборудования необходимо знать его фактическое напряженно-деформированное состояние и изменения в структуре металла. Одним из перспективных направлений решения этой задачи является использование высокопроизводительных средств диагностики, основанных на использовании электромагнитно-акустического (ЭМА) преобразования, позволяющего бесконтактно генерировать акустические волны в объекте контроля и считывать информацию о его техническом состоянии. Но существующие ЭМА средства диагностики не обладают достаточной чувствительностью и информативностью для решения этой задачи. Целью данной работы является совершенствование методов выделения и обработки информативных параметров ЭМА преобразования для решения задач идентификации напряженно-деформированного состояния и поврежденности металла оборудования. Для достижения поставленной цели проведены экспериментальные исследования взаимосвязи параметров ЭМА преобразования с изменениями механических, электрофизических и акустических свойств стандартных образцов металла в процессе испытаний под действием статических нагрузок. В качестве интегрального параметра, характеризующего эту взаимосвязь, использована динамическая математическая модель исследуемого образца металла. Исследования показали, что динамическая математическая модель объекта контроля позволяет однозначно идентифицировать напряженно-деформированное состоя-

ние и поврежденность металла оборудования, но её практическое применение является довольно трудоемким, требующим применения графоаналитического метода анализа. Преобразование динамической математической модели объекта контроля в его частотную модель позволяет применить эффективный метод спектрального анализа, упростить процесс идентификации и повысить её достоверность.

Ключевые слова: авария, пожар, взрыв, выбросы опасных веществ, ущерб, разгерметизация, статистика, электромагнитно-акустическое преобразование, напряженно-деформированное состояние, поврежденность структуры.

IDENTIFICATION OF STRESS-STRAIN STATE AND DAMAGE OF METAL OF EQUIPMENT OF FIRE HAZARDOUS OBJECTS OF OIL AND GAS PRODUCTION USING A DYNAMIC MATHEMATICAL MODEL

© The Author(s) 2023

BASHIROV Mussa Gumerovich, doctor of technical sciences, professor,
head the Department "Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises"

Ufa State Petroleum Technological University
(453250, Gubkin St., 22B, Salavat, Bashkortostan, Russian Federation, e-mail: eapp@yandex.ru)

BASHIROVA Elmira Mussayevna, candidate of technical sciences,
associate professor of the Department "Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises"

Ufa State Petroleum Technological University
(453250, Gubkin St., 22B, Salavat, Bashkortostan, Russian Federation, e-mail: bashirova-elmira@yandex.ru)

YUSUPOVA Ilvina Gamirovna, candidate of technical sciences,
associate professor of the Department "Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises"

Ufa State Petroleum Technological University
(453250, Gubkin St., 22B, Salavat, Bashkortostan, Russian Federation, e-mail: ilvina011@mail.ru)

AKCHURIN Damir Shamilevich, postgraduate full-time student

Ufa State Petroleum Technological University
(453250, Gubkin St., 22B, Salavat, Bashkortostan, Russian Federation, e-mail: akihiro177@mail.ru)

Abstract. The causes of accidents at oil and gas production enterprises, often accompanied by fires, are depressurization and destruction of equipment due to exceeding permissible loads in places of concentration of mechanical stresses weakened by corrosion and other damage. To prevent the destruction of equipment, it is necessary to know its actual stress-strain state and changes in the structure of the metal. One of the promising directions for solving this problem is the use of high-performance diagnostic tools based on the use of electromagnetic-acoustic (EMA) conversion, which allows contactless generation of acoustic waves in the control object and reading information about its technical condition. But the existing EMA diagnostic tools do not have sufficient sensitivity and informativeness to solve this problem. The purpose of this work is to improve the methods of isolation and processing of informative parameters of the EMA transformation for solving problems of identification of the stress-strain state and metal damage of equipment. To achieve this goal, experimental studies of the relationship of the parameters of the EMA transformation with changes in the mechanical, electrophysical and acoustic properties of standard metal samples during testing under static loads were carried out. A dynamic mathematical model of the metal sample under study is used as an integral parameter characterizing this relationship. Studies have shown that the dynamic mathematical model of the object of control allows unambiguously identifying stress-strain state and metal damage of equipment, but its practical application is quite time-consuming, requiring the use of a graphoanalytic method of analysis. The transformation of the dynamic mathematical model of the object of control into its frequency model makes it possible to apply an effective method of spectral analysis, simplify the identification process and increase its reliability.

Keywords: accident, fire, explosion, emissions of hazardous substances, damage, depressurization, statistics, electromagnetic-acoustic transformation, stress-strain state, structural damage.

Для цитирования: Баширов М.Г. Идентификация напряженно-деформированного состояния и поврежденности металла оборудования пожароопасных объектов нефтегазового производства с использованием динамической математической модели / М.Г. Баширов, Э.М. Баширова, И.Г. Юсупова, Д.Ш. Акчурин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 12. – № 4(64). – С. 195-202. – EDN: BPSTVP.

Введение. Предприятия нефтегазового производства являются объектами повышенной опасности из-за применяемых в технологических процессах нефти, газа и продуктов их переработки, способных к горению и взрыву. Пожарная и промышленная безопасность на объектах нефтегазового производства регламентируется целым рядом правовых

актов и нормативных документов [1-4]. Несмотря на все принимаемые меры на объектах нефтегазового производства все же происходят крупные аварии, которые часто являются причинами пожаров, загрязняют окружающую среду, нередко нанося экологический и экономический ущерб целому региону. По данным Федеральной службы по эко-

логическому, технологическому и атомному надзору РФ [5] число аварий на объектах нефтегазового производства и ущерб от них в среднем не сильно изменяются от года к году, причем более половины из них сопровождаются пожарами пролива.

Анализ статистических данных показывает, что аварии на объектах нефтегазового производства обусловлены в основном техническими и организационными причинами. Основными техническими причинами возникновения аварий являются разгерметизация и разрушение оборудования из-за превышения допустимых нагрузок в местах концентрации механических напряжений, ослабленных износом, коррозионным и другими повреждениями. На нарушения механической целостности оборудования приходится 44 % причин крупных аварий на объектах нефтегазового производства. Из организационных причин возникновения аварий можно отметить те, которые непосредственно связаны с техническими причинами и часто способствуют их возникновению – недостаточная квалификация обслуживающего персонала и ошибки при выполнении функциональных обязанностей, недостатки в организации управления техническим состоянием оборудования, ненадлежащее техническое и диагностическое обслуживание оборудования, отсутствие эффективных средств диагностики, нарушения технологий производстве ремонтных и монтажных работ. Преобладание организационных или технических причин аварий на объектах нефтегазового производства напрямую зависит от срока эксплуатации производственного объекта. Если первые 10 лет работы характеризуются преобладанием аварий по организационным причинам, то после 30 лет эксплуатации отказы, связанные с нарушением механической целостности оборудования, являются причиной 65% аварий. Итоги технических расследований аварий свидетельствует, что разрушения оборудования происходят в местах повышенных концентраций механических напряжений, наличия микро- и макродефектов структуры металла. Зачастую неудовлетворительное техническое состояние оборудования обнаруживается техническим персоналом только после его разрушения и развития аварии. Наибольшее количество аварий, связанных с разрушением отдельных элементов оборудования, приходится на технологические трубопроводы – 31%, на насосные и компрессорные станции – 19% и емкостные аппараты – 15% [6-10].

Для раннего выявления поврежденности технологического оборудования необходимо контролировать НДС и изменения в структуре металла. Эта задача может быть решена применением ЭМА средств неразрушающего контроля, позволяющих бесконтактно выявлять дефекты металлов и контролировать НДС конструкций [11-15]. Но существующие ЭМА средства диагностики существенно уступают традиционным акустическим средствам в

чувствительности и точности, поэтому непригодны для надежного выявления зон превышения допустимых механических напряжений и микродефектов металлических конструкций.

За последние десятилетия проведено много исследований, направленных на совершенствование ЭМА метода контроля. Алешин Н.П. предлагает для повышения чувствительности к поверхностным дефектам применять волны Рэлея [16]. Углов А.Л. с коллегами предложил ЭМА устройство для контроля остаточных механических напряжений [17]. Муравьев В.В. с учениками опубликовали работы по ЭМА методу структуроскопии [18], по акустической анизотропии металлического проката [19], по методу повышения чувствительности ЭМА метода применением многократной тени [20]. Ahmad M. разработал метод определения ширины поверхностной трещины [21]. Ducousso M. и Reverdy F. описали ЭМА метод визуализации микротрещин [22]. Trushkevych O. и Edwards R.S. разработали миниатюрные ЭМА преобразователи [23]. Thring C.V. разработал катушки различной геометрии для ЭМА преобразователя [24]. Jiang C, Li Z, Zhang Z, Wang S разработали новую конструкцию ЭМА преобразователя с пространственным сжатием зондирующих импульсов [25]. Sun H, Uchimoto T, и Takagi T предложили новую комбинацию взаиморасположения магнита и катушки ЭМА преобразователя [26]. Zhai G, Li Y, Qin Yi Liu Y описали ЭМА преобразователи с пространственными гармониками [27]. Guo W, Yu Z, Chui HC и Chen X разработали ЭМА преобразователь для дистанционного контроля крупногабаритных и протяженных объектов [28]. Результаты литературного обзора современного состояния ЭМА метода контроля показывают, что совершенствование ЭМА метода контроля происходит за счет повышения технических характеристик ЭМА преобразователей и применения новых способов выделения информации из параметров акустических волн. Информативные параметры электромагнитной составляющей ЭМА преобразования исследованы не достаточно полно.

Баширов М.Г., Баширова Э.М., Юсупова И.Г. и Акчуринов Д.Ш., ссылаясь на результаты своих предыдущих исследований [11, 13, 14], сформулировали свой подход к совершенствованию ЭМА метода контроля, предложив использовать в качестве интегрального параметра, характеризующего напряженное состояние и поврежденность объекта контроля, динамическую математическую модель $W(p)$. Изменение свойств металла под действием нагрузок сопровождается изменением его интегрального параметра, поэтому его можно использовать для идентификации технического состояния объекта контроля [29]:

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = K \frac{b_0 + b_1 \cdot p + \dots + b_m \cdot p^m}{a_0 + a_1 \cdot p + \dots + a_n \cdot p^n} = K \frac{B(p)}{A(p)},$$

где $Y(p)$ и $X(p)$ – отраженный и зондирующий

сигналы;

$B(p)$ и $A(p)$ – многочлены числителя и знаменателя,
 K – коэффициент передачи;

a_i, b_i – коэффициенты многочленов числителя и знаменателя соответственно.

Для контроля механических напряжений и выявления дефектов структуры металла оборудования применяется графоаналитический метод, основанный на использовании координат корней характеристического уравнения интегрального параметра $W(p)$ на комплексной плоскости [11, 14]. Графоаналитический метод характеризуется наглядностью представления результаты контроля, но ограничивает применение программных средств обработки измерительной информации и документирования результатов. Для дальнейшего совершенствования ЭМА метода контроля нефтегазового оборудования необходимо продолжение

исследований.

Целью данной работы является совершенствование методов выделения и обработки информативных параметров ЭМА преобразования для решения задач идентификации напряженно-деформированного состояния и поврежденности металла оборудования.

Методология. Экспериментальные исследования проводились в процессе испытаний на растяжение стандартных плоских образцов сталей Ст3сп, 09Г2С и 12Х18Н10Т.

Испытания образцов сталей проводились с использованием компьютеризованной испытательной машины *Walter + Bai LF TTM-600* (рис. 1) в соответствии с ГОСТ 1497-84 в лаборатории Центра производственной диагностики и неразрушающего контроля ООО «Газпром нефтехим Салават» [30, 31].



Рисунок 1 – Универсальная компьютеризованная испытательная машина *Walter + Bai LF TTM-600*

В процессе исследований для генерирования ультразвуковых волн в объеме образцов металла, считывания и фильтрации отраженного ЭМА сигнала использовался ЭМА прибор EM4000 (рис. 2). Для металлографического анализа изменений в структуре металлов в процессе растяжения использовался металлургический микроскоп Микромед МЕТ С.

Динамический и спектральный анализ сигнала ЭМА преобразователя осуществлялся с использованием пакета программ обработки измерительной информации, графического представления и документирования результатов WinПОС "Expert".

В процессе испытаний образцов металла на диаграмме отмечались характерные точки, в которых наблюдалось резкое изменение механических, электрических, магнитных и акустических свойств металла (точки О, А, В, Д, Р на рисунке 3). В этих точках проводился углубленный анализ изменений

в структуре металла с использованием микроскопа Микромед МЕТ С и анализ соответствующих изменений параметров сигнала ЭМА преобразователя применением пакета программ WinПОС "Expert". Для того, чтобы остаточные напряжения и деформации соответствовали характерным точкам, образцы нагружались с учетом обратимой деформации (точки С, Е, К на рисунке 3).

Результаты. Диаграмма растяжения образца из стали Ст3сп с указанием характерных точек О, А, В, Д, Р, С, Е, К изображена на рисунке 3.

На рисунке 4 приведены фотографии микроструктуры стали Ст3сп до начала испытаний и на участке пластической деформации диаграммы растяжения (точка Е'). На рисунке 5 изображены сигналы ЭМА преобразователя при контроле образца стали Ст3сп в ненагруженном состоянии и при растяжении с напряжением 300 Мпа.

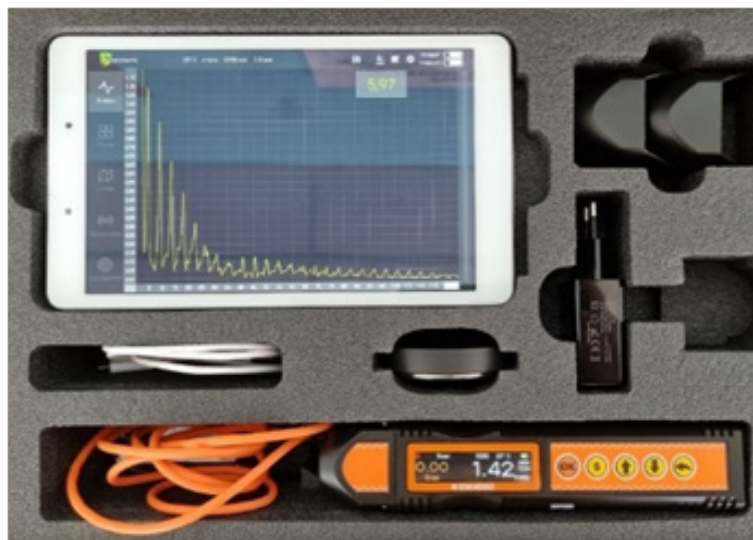


Рисунок 2 – Электромагнитно-акустический прибор EM4000

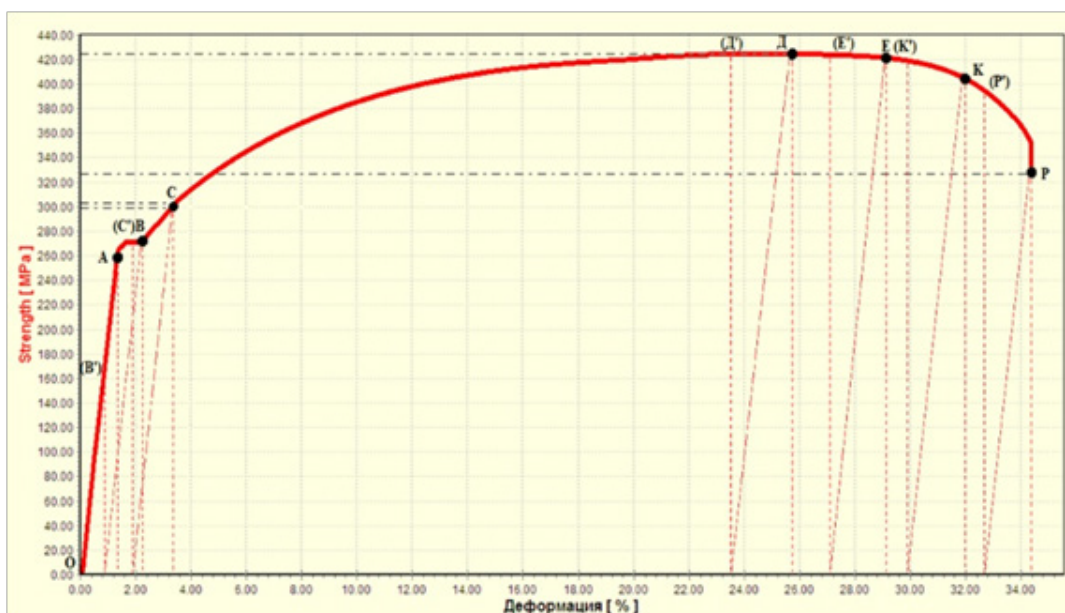
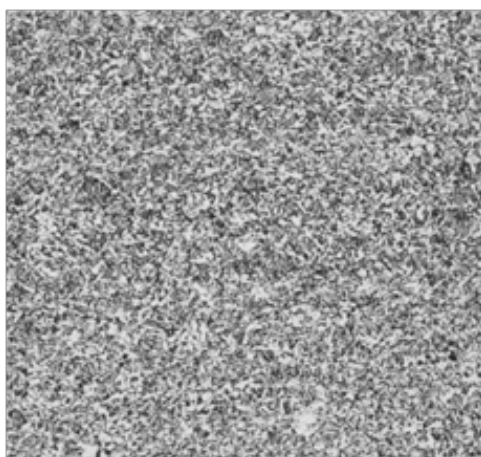
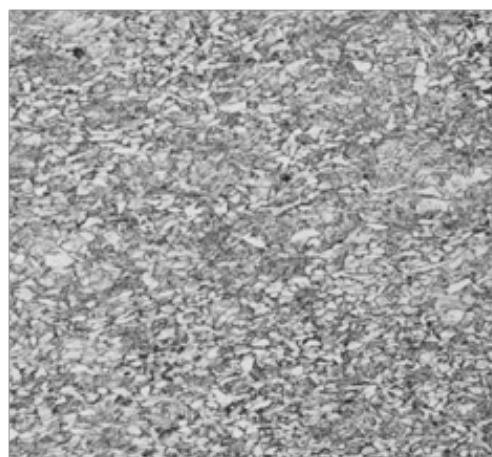


Рисунок 3 – Диаграмма растяжения образца стали Ст3сп (получено авторами)



а)



б)

Рисунок 4 – Микроструктура стали Ст3сп до начала испытаний и на участке пластической деформации диаграммы растяжения (точка E') (микроскоп Микромед МЕТ С, увеличение x100) (получено авторами):
а – без нагрузки; б – при напряжении растяжения 420 МПа

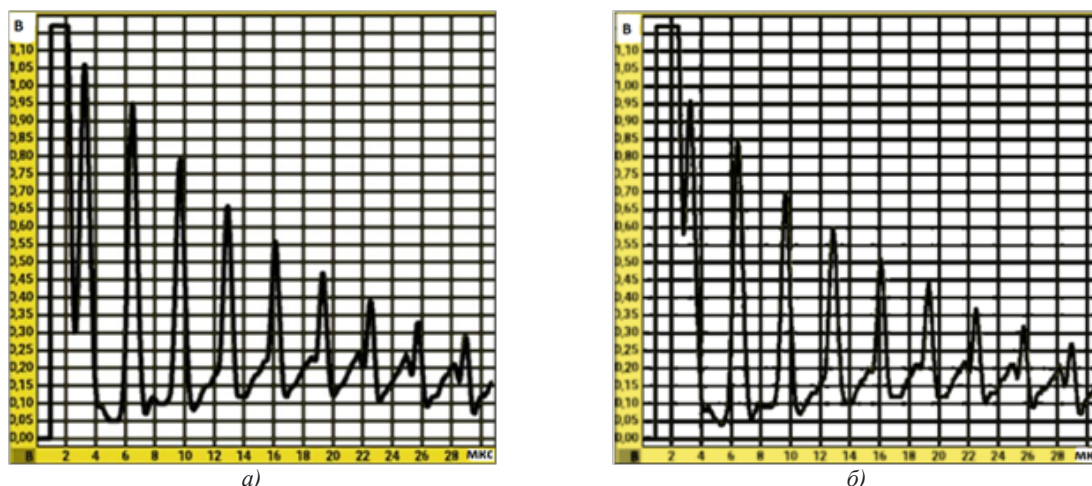


Рисунок 5 – Сигналы ЭМА преобразователя при контроле образца стали СтЗсп (получено авторами):
а – ненагруженное состояние; б – при растяжении с напряжением 300 МПа

Обсуждение. Изменение НДС металлов и накопление повреждений сопровождается изменениями механических, электрических, магнитных и акустических свойств. Исследование взаимосвязи изменения параметров ЭМА преобразования при изменениями механических, электрических, магнитных и акустических свойств металлов при статических и циклических нагрузках провела Хуснутдинова (Юсупова) И.Г. [11]. В работе [12] Bashirov M.G., Minlibaev M.R. и Safin E.M. показали, что локальные неоднородности структуры металла могут рассматриваться в качестве вторичных источников гармоник акустического поля, которые преобразуются в гармонические составляющие сигнала ЭМА преобразователя.

Гипотезы, выдвинутые авторами работ [11, 12], были подтверждены экспериментальными исследованиями, результаты которых представлены в данной работе – изменение НДС и поврежденности металлов сопровождается изменением параметров спектра гармоник сигнала ЭМА преобразователя (рис. 4 и 5).

Исследования показали, что динамическая математическая модель объекта контроля позволяет однозначно идентифицировать НДС и поврежден-

ность металла оборудования, но её практическое применение является довольно трудоемким, требующим применения графоаналитического метода анализа. Преобразование динамической математической модели в частотную модель путем замены оператора p на $j\omega$ позволяет применить метод спектрального анализа, автоматизировать процесс идентификации и повысить её достоверность [29]:

$$W(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = K \frac{b_0 + b_1 \cdot (j\omega) + \dots + b_m \cdot (j\omega)^m}{a_0 + a_1 \cdot (j\omega) + \dots + a_n \cdot (j\omega)^n} = K \frac{B(j\omega)}{A(j\omega)},$$

Каждой точке кривой диаграммы растяжения образца металла соответствует своя частотная модель, поэтому частотные модели могут быть использованы для решения обратной задачи – идентификации текущего НДС металла. Частотная модель объекта исследования графически отображается в виде годографа на комплексной плоскости, эта кривая называется амплитудно-фазовой частотной характеристикой (АФЧХ). Изменение АФЧХ образца стали СтЗсп при изменении статической нагрузки, представленное на рисунке 6, наглядно демонстрирует правомерность применения частотных моделей для однозначной идентификации НДС и поврежденности металлов.

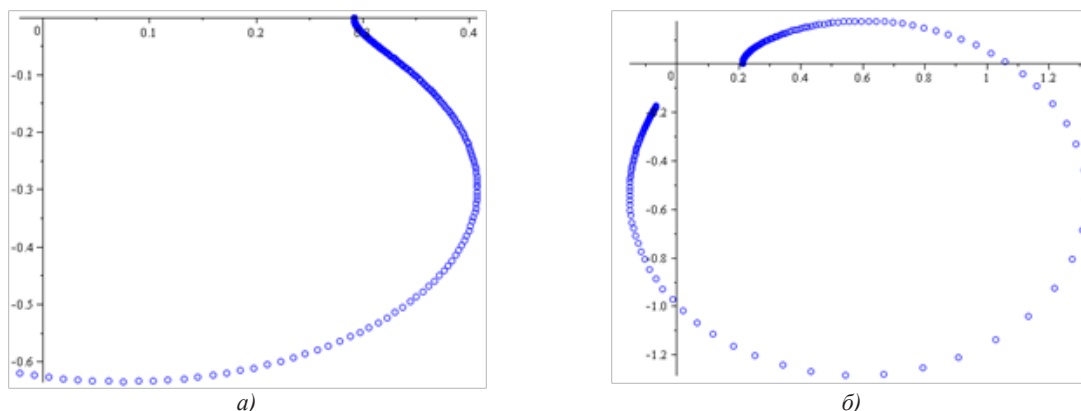


Рисунок 6 – Годографы АФЧХ образца стали СтЗсп при растяжении (получено авторами):
а – без нагружения; б – при напряжении 300 МПа

Выводы. Идентификация напряженно-деформированного состояния и поврежденности металла позволяет предотвратить разгерметизацию и разрушение технологического оборудования объектов нефтегазового производства, часто сопровождающихся пожарами, взрывами и выбросами опасных веществ.

В настоящее время отсутствуют мобильные устройства неразрушающего контроля и диагностики, позволяющие с высокой достоверностью выявлять зоны с повышенными концентрациями механических напряжений и дефекты металла на ранних стадиях развития. Для решения этой задачи перспективным является применение высокопроизводительных бесконтактных электромагнитно-акустических средств неразрушающего контроля и диагностики, но на сегодняшний день они не обладают достаточной чувствительностью и информативностью. Результаты теоретических и экспериментальных исследований показывают, что применение динамической математической модели объекта контроля в качестве интегрального параметра для идентификации напряженно-деформированного состояния и поврежденности металла оборудования позволяет повысить чувствительность и информативность электромагнитно-акустических средств контроля. Дальнейшее совершенствование электромагнитно-акустического метода контроля нефтегазового оборудования связано с использованием частотных моделей, позволяющих применять эффективный спектральный метод для анализа параметров электромагнитно-акустического преобразования, автоматизировать и повысить достоверность идентификации напряженно-деформированного состояния и поврежденности металла оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Федеральный закон от 21.07.1997 г. №116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» [Электронный ресурс] URL: <https://legalacts.ru/doc/federalnyi-zakon-ot-21071997-n-116-fz-o/>.
2. Федеральный закон от 22.07.2008 г. №123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [Электронный ресурс] URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_78699/.
3. ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования [Электронный ресурс] URL: <https://www.reglament.by/wp-content/uploads/docs/gost/GOST-12.1.004-91.pdf>.
4. Правила противопожарного режима в российской федерации. Утверждены постановлением Правительства Российской Федерации от 16.09.2020 г. № 1479. [Электронный ресурс] URL: <https://base.garant.ru/74680206/>.
5. Ежегодные отчеты о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору [Электронный ресурс]. URL: http://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports.
6. Кузьмина Е.С., Варнаков В.В. Анализ причин возникновения чрезвычайных ситуаций на объектах хранения нефти и нефтепродуктов // *Modern Science*. – 2019. – № 4-1. – С. 379-383.
7. Федоров А.В., Оспанов К.К., Ломаев Е.Н., Алешков А.М., Минцаев М.Ш. Анализ статистики и причинно-следственных связей аварий на объектах нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности России и Казахстана // *Технологии техносферной безопасности*. – 2021. – Вып. 2 (92). – С. 156-168.
8. 100 Largest Losses in the Hydrocarbon Industry 1974-2019. 26-th edition, March 2020, pp. 4-16. <https://www.marsh.com/content/dam/marsh/Documents/PDF/UK-en/100-largest-losses-in-hydrocarbon-history.pdf>.
9. Дуляков Г.С., Горбунов А.С., Елфимова М.В., Надежкин И.В. Анализ и обобщение статистических данных по опасным техногенным явлениям на объектах нефтяной промышленности РФ // *Сибирский пожарно-спасательный вестник*. – 2019. – № 3 (14). – С. 7-12.
10. Лебедева М.И., Богданов А.В., Колесников Ю.Ю. Аналитический обзор статистики по опасным событиям на объектах нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности // *Интернет-журнал «Технологии техносферной безопасности»*. – 2018. – С. 8.
11. Хуснутдинова И.Г. Разработка метода оценки ресурса безопасной эксплуатации технологических трубопроводов на основе электромагнитно-акустического эффекта: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03. УГНТУ. Уфа, 2019. – 159 с.
12. Bashirov M.G., Minlibaev M.R., Safin E.M. Theoretical Analysis of Wave Electromagnetic-Acoustic Processes in a Medium During the Operation of an Electromagnetic-Acoustic Transducer // *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, Vladivostok, 2020*. – P. 1-4.
13. Bashirov M.G., Khusnutdinova I.G. The use of electromagnetic-acoustic method for estimating the stress-strain state of the metallic elements of power equipment // *Key Engineering Materials*. – Vol. 743. – 2017. – P. 463-467.
14. Bashirov M.G., Bashirova E.M., Khusnutdinova I.G. The dynamic identification of the technical condition of pipelines on the basis of the analysis of the temporal characteristics of electromagnetic-acoustic signal // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – P. 12042.
15. Баширов М.Г., Баширова Э.М., Юсупова И.Г., Акчурин Д.Ш. Исследование способов повышения эффективности электромагнитно-акустического преобразования средств диагностики энергетического оборудования // *Промышленная энергетика*. – 2022. – № 10. – С. 2-10.
16. Алешин Н.П. Исследование выявляемости поверхностных объемных дефектов при ультразвуковом контроле с применением волн Рэлея, генерируемых электромагнитно-акустическим преобразователем // *Дефектоскопия*. – 2021. – № 5. – С. 22-30.
17. Углов А.Л., Хлыбов А.А., Бычков А.Л., Кувшинов М.О. О неразрушающем контроле остаточных напряжений в деталях осесимметричной формы из стали 03Н17К10В10МТ // *Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова*. – 2019. – Т. 22. – № 4. – С. 3-9.
18. Муравьев В. В., Будрин А.Ю., Синцов М.А. Структуроскопия термически обработанных стальных прутков по скорости распространения рэлеевских волн // *Интеллектуальные системы в производстве*. – 2020. – Т. 18. – № 2. – С. 37-20.
19. Волкова Л.В., Муравьева О.В., Муравьев В.В. Неравномерность акустической анизотропии толстолистового стального проката // *Сталь*. – 2021. – № 5. – С. 36-41.
20. Муравьева О.В., Волкова Л.В., Муравьев В.В., Синцов М.А., Мышкин Ю.В., Башарова А.Ф. Чувствительность электромагнитно-акустического метода многократной тени с использованием рэлеевских волн при контроле труб нефтяного сортамента // *Дефектоскопия*. – 2020. – № 12. – С. 48-57.
21. Ahmad M. Characterization of surface crack width in plates using Rayleigh wave electromagnetic acoustic transducers // *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* – 2021. – V. 1043. – No. 4. – P. 042038.
22. Ducousso M., Reverdy F. Real-time imaging of micro-cracks on metallic surface using total focusing method and plane wave imaging with Rayleigh waves // *NDT E Int.* – 2020. – V. 116. – P. 102311.
23. Trushkevych O., Edwards R.S. Characterisation of small defects using miniaturised EMAT system // *NDT & E International*. – 2019. – V. 107. – P. 102140.
24. Thring C.B. The effect of EMAT coil geometry on the Rayleigh wave frequency behaviour // *Ultrasonics*. – 2019. – V. 99. – P. 105945.
25. Jiang C, Li Z, Zhang Z, Wang S. New Design to Rayleigh Wave EMAT Based on Spatial Pulse Compression. *Sensors (Ba-*

sel). 2023 Apr 13; 23(8):3943.

26. Sun H, Uchimoto T, Takagi T. New Combination of Magnet and Coil of Electromagnetic Acoustic Transducer for Generating and Detecting Rayleigh Wave. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control. 2020 Apr; 67(4):832-839.

27. Zhai G, Li Y, Qin Y, Liu Y. Design Method of Multiwavelength EMATs Based on Spatial Domain Harmonic Control. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control. 2021 Jun; 68(6): 2259-2270. Epub 2021 May 25.

28. Guo W, Yu Z, Chui HC, Chen X. Development of DM-PS-EMAT for Long-Distance Monitoring of Broken Rail. Sensors (Basel). 2023 Jun 14; 23(12): 5583.

29. Баширов М.Г., Баширова Э.М., Юсупова И.Г., Акчурин Д.Ш., Юлбердин Р.Т. Идентификация напряженно-деформированного состояния и поврежденности структуры металла строительных конструкций с нанопокрытиями электромагнитно-акустическим методом // Нанотехнологии в строительстве. – 2023. – Т. 15. – № 5. – С. 482-493.

30. Баширов М.Г., Баширова Э.М., Юсупова И.Г., Драцкий В.О., Мургазина А.И., Квачинский С.А. Моделирование и экспериментальное исследование влияния механических напряжений и поврежденности металла нефтегазового оборудования на параметры электромагнитно-акустического преобразования // Нефтегазовое дело. – 2023. – Т. 21. – № 1. – С. 183-194.

31. Ахметшин А.З., Шлейников С.В., Лунёва Н.Н., Баширов М.Г., Газиев Р.Р., Захаров Н.М., Баширова Э.М., Юсупова И.Г., Юлбердин Р.Т. Исследование взаимосвязанных изменений механических, электрофизических и акустических свойств металлов для решения задачи идентификации напряженно-деформированного состояния и поврежденности нефтегазового оборудования // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2023. – № 7-8. – С. 56-62.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований малыми отдельными научными группами», проект № 22-29-00327 - «Исследование взаимосвязанных изменений механических, электрофизических и акустических свойств металлов для реализации интеллектуальной электромагнитно-акустической системы идентификации напряженно-деформированного состояния и поврежденности нефтегазового оборудования».

Статья поступила в редакцию 21.08.2023

Статья принята к публикации 15.12.2023

УДК 621.31

EDN: BWZCCG

СНИЖЕНИЕ РИСКА ВРЕДНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ПЕРСОНАЛ

© Автор (ы) 2023

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. В статье рассмотрены вопросы электромагнитной безопасности электротехнического персонала, обслуживающего тяговые сети электрифицированных железных дорог. Указаны направления развития железнодорожного транспорта, приведена классификация магистральных электровозов разного рода тока Российских железных дорог. Проанализированы результаты экспериментальных исследований магнитных полей 50 Гц в электровозах ВЛ80^С. Целью работы является создание новых устройств – сигнализаторов, информирующих машинистов и помощников о вредном превышении магнитного поля 50 Гц. Приведены объект и предмет исследования. Для осуществления электромагнитной безопасности персонала на электроподвижном составе предложено использовать устройство контроля магнитных полей 50 Гц, которое позволяет измерять уровни магнитных полей и сигнализировать персоналу о превышении или не превышении предельно допустимых уровней (ПДУ). Его устанавливают в машинном отделении электроподвижного состава, а элемент устройства, для вывода сигнала, в кабину машиниста (помощника машиниста). Результаты исследований магнитных полей предшественниками, в машинных отделениях подобных электровозов, подтверждают необходимость использования предлагаемых устройств. Применение устройств-сигнализаторов позволит усовершенствовать имеющиеся инновационные комплексы безопасности движения поездов и снизить риск вредного воздействия электромагнитных полей на помощников машинистов (машинистов).

Ключевые слова: магнитные поля, безопасность, электромагнитная безопасность, локомотив, электровоз, железнодорожный транспорт, комплексы безопасности, предельно допустимый уровень.

REDUCING THE RISK OF HARMFUL EFFECTS OF MAGNETIC FIELDS ON PERSONNEL

© The Author(s) 2023

ZAKIROVA Alfiya Rezavanovna, candidate of technical sciences,
Associate professor of the Department "Technosphere Safety"*Ural State University of Railway Transport
(66 Kolmogorova str., Yekaterinburg, 620034, Russia, e-mail: AZakirova@usurt.ru)*

Abstract. The article deals with the issues of electromagnetic safety of electrical personnel serving traction networks of electrified railways. The directions of development of railway transport are indicated, the classification of mainline electric locomotives of various kinds of current of Russian railways is given. The results of experimental studies of 50 Hz magnetic fields in VL80S electric locomotives are analyzed. The aim of the work is to create new signaling devices that inform drivers and assistants about the harmful excess of the 50 Hz magnetic field. The object and subject of the study are given. To implement the electromagnetic safety of personnel on an electric rolling stock, a 50 Hz magnetic field monitoring device is proposed, which allows measuring the levels of magnetic fields and signaling to personnel about exceeding or not exceeding the maximum permissible levels (remote control). It is installed in the engine room of an electric rolling stock, and the device element, for signal output, is installed in the driver's cabin (assistant driver). The results of studies of magnetic fields by predecessors, in the engine rooms of such electric locomotives, confirm the need to use the proposed devices. The use of signaling devices will improve the existing innovative train safety systems and reduce the risk of harmful effects of electromagnetic fields on assistant drivers (machinists).

Keywords: magnetic fields, safety, electromagnetic safety, locomotive, electric locomotive, railway transport, safety complexes, maximum permissible level.

Для цитирования: Закирова А.Р. Снижение риска вредного воздействия магнитных полей на персонал / А.Р. Закирова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 12. – № 4(64). – С. 203-206. – EDN: BWZCCG.

Введение. При эксплуатации электрооборудования энергетического комплекса железнодорожного транспорта, вопросы электромагнитной безопасности актуальны как при исследованиях тяговых сетей электрифицированных железных дорог [1-20], так и электроподвижного состава. Железнодорожные компании разрабатывают программы стратегического развития. К основным

направлениям этого развития относят: развитие транспортно-логистических услуг и инфраструктуры, модернизацию подвижного состава, безопасность движения поездов и персонала. В программах стратегического развития отдельным блоком выделяют безопасность персонала, в том

числе и электромагнитную. Как известно, чем мощнее электроподвижной состав, тем выше уровни электромагнитных полей.

На рисунке 1 приведены современные, мощные и востребованные электровозы в зависимости от системы электрификации.

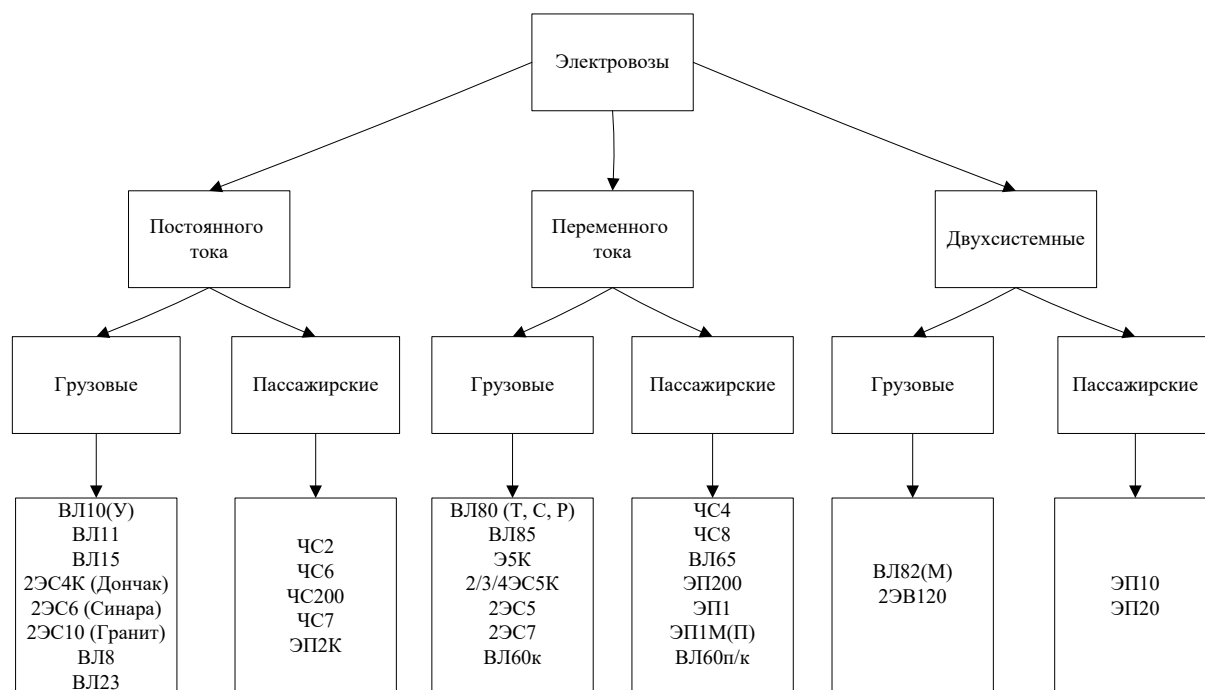


Рисунок 1 – Классификация магистральных электровозов Российской железных дорог

Многие локомотивы оборудованы системами безопасности: КЛУБ-У (комплексное локомотивное устройство безопасности), САУТ (система автоматического управления торможением поездом) и ТСКБМ (телемеханическая система контроля бодрствования машиниста). Недостатком этих систем является, то, что они функционируют независимо друг от друга. С целью повышения уровня безопасности на железнодорожном транспорте: внедряют инновационные комплексы безопасности движения поездов, контролируют уровень подготовки персонала, обслуживающего электроподвижной состав. Комплекс БЛОК (безопасный локомотивный объединенный комплекс) решает те же задачи, что и приведенные системы, но при их совместном использовании. Также БЛОК может использоваться как автономно, так и совместно с другими микропроцессорными системами управления.

Уровень безопасности на железнодорожном транспорте связан и с условиями работы персонала, осуществляющего пассажирские и грузовые перевозки, подвергающегося воздействию вредных производственных факторов, в том числе и электромагнитных полей [2; 7;13-20]. Для улучшения условий труда разрабатывают и внедряют технические средства защиты.

Целью работы является создание новых устройств – сигнализаторов, информирующих маши-

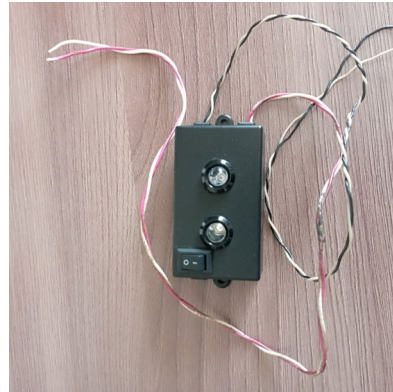
ниста о вредном превышении магнитного поля 50 Гц. Применение данных устройств существенно повысит уровень магнитной безопасности персонала, обслуживающего электроподвижной состав. Объект исследования – это условия труда помощников машинистов, а предмет – уровни магнитных полей 50 Гц.

Методология. Для осуществления «защиты временем» то есть снижения времени воздействия магнитных полей 50 Гц на помощника машиниста (машиниста) можно использовать устройства контроля вредных производственных факторов. Устройство для контроля переменных магнитных полей 50 Гц позволяет измерять уровни магнитных полей 50 Гц и сигнализировать персоналу о превышении или не превышении предельно допустимых уровней (ПДУ). Его (рис. 2, а) устанавливают в машинном отделении электроподвижного состава, а элемент устройства, для вывода сигнала (рис. 2, б) в кабине машиниста.

Устройство ИМП УрГУПС-1 содержит пороговый элемент, который постоянно сравнивает измеренные значения с ПДУ в 100 мкТл, при превышении ПДУ – загорается красный светодиод, в этом случае персоналу небезопасно находиться в машинном отделении вблизи высоковольтной камеры. Устройство было экспериментально протестировано в электровозе ВЛ80с. Расположение контрольных точек исследования приведены на рисунке 3.



а)



б)

Рисунок 2 – Устройство для контроля уровней магнитных полей (а), элемент устройства, для вывода сигнала в кабину электровоза (б)

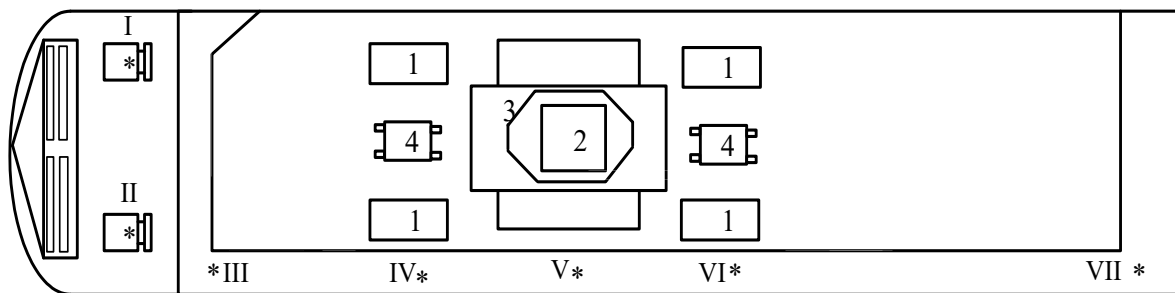


Рисунок 3 – Эскиз электровоза ВЛ80с с расположением точек исследования

Локомотив работал в режиме холостого хода и тяги. Данные фиксировались в протоколе исследований. I...VII – расположение точек измерения; 1 – выпрямительная установка; 2 – переходный реактор; 3 – тяговый трансформатор; 4 – сглаживающий реактор.

Результаты исследования. Результаты исследований приведены в таблице 1.

Исследования показали, что устройство ИМП УрГУПС-1 исправно сигнализировало локомотивной бригаде либо о превышении ПДУ магнитной

индукции 50 Гц (100 мкТл), при этом загорался красный светодиод, либо о не превышении ПДУ – зеленый светодиод.

Полученные результаты соответствуют заявленным целям исследования.

Таблица 1 – Данные о тестировании устройства ИМП УрГУПС-1 в электровозе ВЛ80с

Измеряемый параметр	Точка измерения	Ток на тяговых двигателях $I_{то}$, А	Показания сигнализатора, мкТл	Срабатывание ИМП УрГУПС-1
Магнитная индукция (50 Гц), мкТл	I	500	3,5	зеленый светодиод
	II	500	3,6	зеленый светодиод
	III	500	20,1	зеленый светодиод
	IV	400	143	красный светодиод
	V	550	236	красный светодиод
	VI	800	150	красный светодиод

*I (кабина, место машиниста), II (кабина, место помощника машиниста), III (вход в машинное отделение), IV (машинное отделение, выпрямительная установка), V (машинное отделение, тяговый трансформатор), VI (машинное отделение, выпрямительная установка)

Обсуждение. В настоящее время исследованиями магнитных полей и разработкой средств защиты персонала занимаются многие ученые. Например, Клименко Л.Н. [2] исследовал магнитные поля в подобных электровозах: ВЛ80* и ВЛ80^р. Было определено, что уровни напряженностей переменных магнитных полей в ВЛ80* при 8-ми часовой экспозиции превышают ПДУ, как в кабине, так и в машинном отделении электровозов. Следует отметить, что переменное магнитное в отдельных

точках машинного отделения до 20 раз превышало ПДУ, что подтверждает необходимость разработки средств защиты с учетом специфики работы электрооборудования.

Выводы. Проведенные исследования подтверждают актуальность разработки, и использования устройств контроля магнитных полей 50 Гц. Предлагаемые устройства-сигнализаторы позволяют усовершенствовать имеющиеся инновационные комплексы безопасности движения поездов. При

использовании вышеуказанных устройств работодатель сможет обеспечить электромагнитную безопасность машинистов (помощников машинистов), снизить риск вредного воздействия магнитных полей 50 Гц на персонал. Установить эти устройства возможно, как на этапе модернизации локомотива, так и при проведении технических обслуживаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Новые технологии для железных дорог // Первая локомотивная компания. 2020. 28с.
2. Климченко Л. Н. Безопасность труда при эксплуатации и ремонте подвижного состава в условиях влияния магнитных полей [текст]: дис. ... канд. тех. наук: 05.26.01 / Климченко Лев Николаевич. – Ростов-на-Дону. 1984. – 200 с.
3. Косарев А.Б. Электромагнитные процессы в системе тягового снабжения 2×25 кВ отсоединёнными от рельсового пути опорами контактной сети / А. Б. Косарев // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2016. – Т. 75. – № 2. – С. 74-81.
4. Косарев А.Б. Обеспечение электробезопасности систем электроснабжения электрифицированных железных дорог переменного тока для линий ВСМ / А. Б. Косарев, А.В. Барц, Е.Н. Розенберг // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2018. – Т. 77. – № 6. – С. 337-346.
5. Kosarev A.B. System provisions of electromagnetic compatibility between S&C and AC traction power supply facilities / A.B. Kosarev, D.V. Serbinenko // Vniizht Bulletin (Railway Research Institute Bulletin). – 2012. – № 1. – С. 27-31.
6. Kosarev A.B. Traction power supply system with negligible voltage unbalance ratio on the input side of the main traction transformer / A.B. Kosarev, M.V. Alexeenko // Vniizht Bulletin (Railway Research Institute Bulletin). – 2015. – № 2. – С. 20-24.
7. Кузнецов К.Б. Основы электробезопасности в электроустановках. М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте». – 2017. – 495с.
8. Титов Е.В. Автоматизация выбора защитных мероприятий по обеспечению электромагнитной безопасности / Е.В. Титов, А.А Сошников, И.Е Мигалёв // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2020. – № 5 (187). – С. 166-175
9. Титов Е.В. Оценка защитного действия многослойного экрана в электрическом поле широкого диапазона частот / Е.В. Титов, А.А Сошников, Л.В. Куликова // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2019. – № 9 (179). – С. 157-162.
10. Titov E.V. A low-frequency electromagnetic radiation analyzer to determine the risk-contributing factors of an electromagnetic situation/ E.V. Titov, A.A. Soshnikov, O.N. Drobyazko // Russian Electrical Engineering. – 2018. – Т. 89. – № 12. – С. 714-716.
11. Soshnikov A.A. A Mobile system for integrated characterization of electromagnetic radiation danger / A.A. Soshnikov, E.V. Titov, I.E. Migalev // Russian Electrical Engineering. – 2018. – Т. 89. – № 12. – С.685-688.
12. 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 traction consumers / Е.В. Титов, А.А Сошников, Л.В. Куликова // Russian Electrical Engineering. – 2020. – Т. 91. – № 2. – С. 128-134.
13. Kuznetsov K.B. Higher Harmonic Components of Rectifiers Magnetic Fields and their Adverse Health Effects. / K.B. Kuznetsov, A.R. Zakirova // Procedia Engineering. – 2015. – vol. 129. – Pp. 415-419.
14. Kuznetsov K.B. Assessment of Harmful Health Effects of AC Rectifier Converters Harmonic Components. / K.B. Kuznetsov, A.R. Zakirova // Procedia Engineering. – 2015. – vol. 129. – Pp. 420-426
15. Коробенков А.Д. Воздействие переменных магнитных полей низких частот на организм человека / А.Д. Коробенков, С.М Коробейников, М.С. Акрамова // Безопасность в техносфере. – 2016. – Т. 5. – № 6. – С.65-75.
16. Закирова А.Р. Концепция оценки аддитивного

воздействия на персонал электрических и магнитных полей до 1 кГц // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 2 (42). – С. 87-93.

17. Кузнецов К.Б., Закирова А.Р. Аддитивное воздействие электрических и магнитных полей на электротехнический персонал // Безопасность труда в промышленности. – 2021. – № 4. – С. 27-31.

18. Kuznetsov K., Zakirova A., Averyanov U. Specific energy of 50 Hz electromagnetic field. / 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017 - Proceedings. Electronic edition. 2017. – pp. 8076222.

19. Nikulin A., Nikulina A.Y. 2017. Assessment of occupational health and safety effectiveness at a mining company. Ecology, Environment and Conservation. 23(1). – pp. 351-355.

20. Sabrina Leticia Couto da Silvaa. Critical factors of success and barriers to the implementation of occupational health and safety management systems: A systematic review of literature/Sabrina Leticia Couto da Silvaa, Fernando Gonçalves Amarala. Safety Science. 2019. Volume 117. – pp. 123-132.

Статья поступила в редакцию 20.09.2023

Статья принята к публикации 15.12.2023

УДК 331.452

EDN: CCKSRP

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ И НАРУШЕНИЙ СЛУХА
НА ВОСПРИЯТИЕ СИГНАЛОВ ЗАДНЕГО ХОДА ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ**

© Авторы 2023

SPIN: 7351-2476

AutorID: 312370

ORCID: 0000-0003-4460-5960

ScopusID: 57197837537

ДМИТРИЕВ Михаил Сергеевич, доктор технических наук, профессор кафедры технического сервиса машин, оборудования и безопасности жизнедеятельности
Южно-Уральский государственный аграрный университет
(Россия, 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 75, e-mail: oad2005@mail.ru)

SPIN: 3472-4000

AutorID: 690347

СТАРУНОВ Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технического сервиса машин, оборудования и безопасности жизнедеятельности
Южно-Уральский государственный аграрный университет
(Россия, 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 75, e-mail: alex_starunov68@mail.ru)

SPIN: 4272-2457

AutorID: 423388

ORCID: 0000-0001-9776-6907

ScopusID: 57205193883

РУДНЕВ Валерий Валентинович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автомобильного транспорта, информационных технологий и методики обучения техническим дисциплинам
Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет
(Россия, 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 69, e-mail: rudnevvv@cspu.ru)

SPIN: 3166-5689

AutorID: 465606

ORCID: 0000-0002-6558-2254

ScopusID: 57197824964

ХАСАНОВА Марина Леонидовна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автомобильного транспорта, информационных технологий и методики обучения техническим дисциплинам
Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет
(Россия, 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 69, e-mail: marina24-03@mail.ru)

Аннотация. Ежегодно происходят несчастные случаи на производстве, связанные с наездом на рабочих автомобилей, движущихся задним ходом. Некоторые характеристики наиболее часто используемых тональных сигнализаций заднего хода не позволяют им достаточно эффективно предупреждать работающих о приближении транспортного средства. Можно выделить три основных недостатка тональной сигнализации: затруднения в определении местоположения источника звукового сигнала в пространстве, неравномерность распространения звука позади грузового автомобиля, а также повышенное акустическое загрязнение окружающей среды. Проведенные ранее исследования доказали преимущества широкополосного сигнала заднего хода грузовых автомобилей перед тональным с точки зрения обеспечения безопасности работников с нормальным слухом, независимо от того, применяют ли они средства индивидуальной защиты (СИЗ) органов слуха или нет. Широкополосная сигнализация отличается более равномерным характером распространения звука за транспортными средствами, и источник сигнала этого типа легче определяется в пространстве. Некоторые преимущества тональной сигнализации (возможность обнаружения сигнала при более низких уровнях звука и способность вызывать более сильное чувство опасности) перечеркиваются значительными колебаниями (порядка 15-20 дБ) уровня звука в опасной зоне непосредственно за автомобилем, маневрирующим задним ходом. При этом тугоухость довольно часто встречается у работающих в производственной среде с повышенным уровнем шума, поэтому целью данного исследования является оценка влияния нарушений слуха на восприятие и локализацию звуковых сигналов заднего хода грузовых автомобилей при использовании СИЗ органов слуха (берушей или наушников).

Ключевые слова: безопасность и условия труда, грузовой автомобиль, сигнал заднего хода, локализация, порог реагирования, средства индивидуальной защиты.

**STUDY OF THE INFLUENCE OF PERSONAL PROTECTION EQUIPMENT AND HEARING
IMPAIRMENTS ON THE PERCEPTION OF THE TRUCKS REVERSE SIGNALS**

© The Authors 2023

DMITRIEV Mikhail Sergeevich, doctor of engineering sciences, professor of the department of Technical Service of Machines, Equipment and Life Safety

South Ural State Agrarian University

(Russia, 454080, Chelyabinsk, 75 Lenin Ave., e-mail: oad2005@mail.ru)

STARUNOV Aleksandr Vladimirovich, candidate of engineering sciences, associate professor, head of the department of Technical Service of Machines, Equipment and Life Safety

South Ural State Agrarian University

(Russia, 454080, Chelyabinsk, 75 Lenin Ave., e-mail: alex_starunov68@mail.ru)

RUDNEV Valery Valentinovich, candidate of engineering sciences, associate professor, head of the department of Automobile Transport, Information Technologies and Methods of Teaching Technical Disciplines

South Ural State Humanitarian Pedagogical University

(Russia, 454080, Chelyabinsk, 69 Lenin Ave., e-mail: rudnevrv@cspu.ru)

KHASANOVA Marina Leonidovna, candidate of engineering sciences, associate professor, associate professor of the department of Automobile Transport, Information Technologies and Methods of Teaching Technical Disciplines

South Ural State Humanitarian Pedagogical University

(Russia, 454080, Chelyabinsk, 69 Lenin Ave., e-mail: marina24-03@mail.ru)

Abstract. Every year there are industrial accidents associated with collisions with cars moving in reverse. Some characteristics of the most commonly used reversing alarm systems do not allow them to be very effective in warning workers that a vehicle is approaching. There are three main disadvantages of tone signaling: difficulties in determining the location of the sound signal source in space, uneven sound propagation behind the truck, and increased acoustic pollution of the environment. Previous research has demonstrated the superiority of broadband truck reverse signals over tone signals for the safety of workers with normal hearing, whether or not they are wearing hearing personal protective equipment. Broadband signaling is characterized by a more uniform sound propagation behind vehicles, and the source of this type of signal is more easily determined in space. Some of the advantages of tone alarms (the ability to detect the signal at lower sound levels and the ability to create a stronger sense of danger) are negated by significant fluctuations (on the order of 15-20 dB) in the sound level in the danger zone directly behind the vehicle maneuvering in reverse. At the same time, hearing loss is quite common among those working in industrial environments with high noise levels, so the purpose of this study is to assess the impact of hearing impairment on the perception and localization of sound signals from trucks reversing when using personal hearing protectors (earplugs or headphones).

Keywords: safety and working conditions, truck, reverse signal, localization, response threshold, personal protective equipment.

Дмитриев М.С. Исследование влияния средств индивидуальной защиты и нарушений слуха на восприятие сигналов заднего хода грузовых автомобилей / М.С. Дмитриев, А.В. Старунов, В.В. Руднев, М.Л. Хасанова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 12. – № 4(64). – С. 207-214. – EDN: CCKSRP.

Введение. Ежегодно происходят несчастные случаи на производстве, связанные с наездом на рабочих автомобилей, движущихся задним ходом [1-4]. Некоторые характеристики наиболее часто используемых тональных сигнализаций заднего хода не позволяют им достаточно эффективно предупреждать работающих о приближении транспортного средства. Можно выделить три основных недостатка тональной сигнализации: затруднения в определении местоположения источника звукового сигнала в пространстве, неравномерность распространения звука позади грузового автомобиля, а также повышенное акустическое загрязнение окружающей среды. Проведенные ранее исследования доказали преимущества широкополосного сигнала заднего хода грузовых автомобилей перед тональным с точки зрения обеспечения безопасности работников с нормальным слухом, независимо от того, применяют ли они средства индивидуальной защиты (СИЗ) органов слуха или нет.

При этом тугоухость довольно часто встречается у работающих в производственной среде с повышенным уровнем шума, поэтому целью данного

исследования является оценка влияния нарушений слуха на восприятие и локализацию звуковых сигналов заднего хода грузовых автомобилей при использовании СИЗ органов слуха (берушей или наушников).

Ранее проведенные исследования, направленные на сравнение эффективности тональной и широкополосной сигнализации заднего хода с точки зрения обеспечения безопасности труда показали следующие результаты.

Широкополосная сигнализация отличается более равномерным характером распространения звука за транспортными средствами, и источник сигнала этого типа легче определяется в пространстве. Некоторые преимущества тональной сигнализации (возможность обнаружения сигнала при более низких уровнях звука и способность вызывать более сильное чувство опасности) перечеркиваются значительными колебаниями (порядка 15-20 дБ) уровня звука в опасной зоне непосредственно за автомобилем, маневрирующим задним ходом.

Исследование, опубликованное в статье «Сравнительный анализ характеристик различных типов

сигнализации заднего хода грузовых автомобилей» (XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022. – Т. 11. – № 2(58). – С. 159-163), подтвердило, что широкополосная сигнализация образует более однородное звуковое поле позади транспортных средств. Также было выявлено превосходство широкополосной сигнализации с точки зрения локализации звука, даже в условиях, когда рабочий выполняет производственную задачу. Кроме того, анализ порогов обнаружения и реагирования, измеренных у людей с нормальным слухом, не использующих СИЗ, доказал преимущество широкополосной сигнализации в условиях фонового шума, характерного для той или иной производственной среды, что описано в статье «Определение оптимальных параметров настройки сигнализации заднего хода грузовых автомобилей» (XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс – Пенза, 2021 – Т. 10, № 2 (54) – С. 173-177).

В следующем исследовании, представленном в статье «Исследование влияния средств индивидуальной защиты органов слуха на восприятие и локализацию сигналов заднего хода грузовых автомобилей» (XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс – Пенза, 2020 – Т. 9, № 3 (51) – С. 184-187), были определены пороги обнаружения, пороги реагирования и характеристики локализации звука у людей с нормальным слухом, носящих защитные каски и средства защиты органов слуха. Результаты подтвердили, что широкополосный сигнал легче локализовать, при этом реакция (осознание необходимости срочно покинуть опасную зону) проявляется при более низком отношении сигнал/шум (по сравнению с тональной сигнализацией) с использованием СИЗ органов слуха и без них. В целом, эффективность сигнализации заднего хода без использования рабочими СИЗ оказалась выше, чем при их применении.

Во всех упомянутых выше исследованиях участвовали люди с нормальным слухом. Однако известно, что значительное число работников ежедневно подвергается воздействию повышенного уровня шума на рабочем месте и что у многих из них развивается профессиональная тугоухость. Это может снизить возможности восприятия и локализации источников звука, таких как сигнализация заднего хода грузовых автомобилей.

Поскольку наличие нарушений слуха у рабочих и ношение СИЗ являются двумя неизбежными реалиями рабочих мест с повышенным уровнем шума, целью данного исследования является оценка влияния нарушений слуха в сочетании с ношением средств индивидуальной защиты (наушников, берушей) на восприятие и локализацию звуковых сигналов заднего хода транспортных средств.

У людей с нормальным слухом СИЗ зачастую не снижают возможность обнаружения сигналов заднего хода при наличии фонового шума, а иногда даже повышают ее [5].

Например, при фоновом шуме в 85 дБА пороги обнаружения тонального сигнала при ношении СИЗ органов слуха оказались примерно на 3...4 дБ ниже, чем без них. Это улучшение также было отмечено при обнаружении других звуковых сигналов и восприятии речи в условиях высокого уровня фонового шума [6-10].

Несмотря на указанное преимущество в плане обнаружения звукового сигнала в среде с относительно высоким уровнем шума, ношение средств защиты органов слуха способствует уменьшению расстояния, на котором сигнал заднего хода может быть обнаружен в относительно тихой среде, сокращая при этом время на то, чтобы покинуть опасную зону [12-15]. Расстояние обнаружения также было исследовано для других звуковых раздражителей. Результаты показывают, что в целом специализированные средства защиты органов слуха значительно уменьшают расстояние обнаружения, особенно если звуковой раздражитель насыщен высокими частотами [11-16].

Ношение СИЗ может негативно влиять на обнаружение звуковых предупреждающих сигналов у людей с нарушениями слуха, этот эффект зависит от частотного содержания сигнала, а также от характера нарушения слуха [17].

В большинстве вышеперечисленных исследований участвовали люди с нормальным слухом. Насколько нам известно, в настоящее время не существует исследований специально посвященных локализации сигналов заднего хода транспортных средств людьми с нарушениями слуха при использовании СИЗ органов слуха.

Основная цель данного исследования – определить влияние нарушений слуха и применения СИЗ органов слуха на пороги обнаружения и пороги реагирования, а также локализацию звука двух основных типов сигнализаций (тональных и широкополосных).

Достижение цели предполагает решение следующих задач:

1. Определить в лабораторных условиях соотношение сигнал/шум, оптимальное с точки зрения обнаружения и реагирования на два основных типа сигналов заднего хода при наличии нарушений слуха с использованием средств защиты органов слуха и без них.

2. Оценить в лабораторных условиях способность работников с нарушениями слуха локализовать сигнал заднего хода (тональный или широкополосный) при выполнении производственной задачи с применением или без применения СИЗ органов слуха.

Методология. В данном исследовании применялись две сигнализации заднего хода: тональная и широкополосная.

В качестве фонового шума использовался звук, возникающий в процессе производства древесной щепы. Для всех опытов уровень шума составлял

80 дБА (он измерялся на расстоянии 0,5 метра от громкоговорителя).

Для проведения исследований были выбраны активные беруши *3M PELTOR Tactical* и активные наушники *Howard Leight IMPACT H*.

В общей сложности 24 человека с нормальным слухом (19 женщин и 5 мужчин) в возрасте от 20 до 34 лет (среднее значение = 23,8 года) и 24 человека с нарушениями слуха (8 женщин и 15 мужчин) в возрасте от 22 до 71 года (среднее значение = 59,3 года) приняли участие в измерении порогов обнаружения и порогов реагирования двух типов сигнализации заднего хода.

Пороги обнаружения и пороги реагирования были измерены для каждого из сигналов заднего хода (тонального и широкополосного) в пяти различных условиях прослушивания: 1) без СИЗ органов слуха, 2) наушники в пассивном режиме, 3) наушники в активном режиме, 4) беруши в пассивном режиме, 5) беруши в активном режиме. Одна защитная каска использовалась без СИЗ органов слуха и с берушами, в то время как наушники были установлены на второй такой же каске. Каждый порог измерялся дважды.

Измерения порогов обнаружения проводились в условиях фонового шума и без него, пороги реагирования определялись только при наличии фонового шума.

Исследования проводились в звукоизолированной кабине размером 4,29 м x 3,65 м x 2,42 м (длина/ширина/высота), при этом динамик, находящийся на расстоянии 0,5 м позади центра головы сидящего человека, использовался для подачи сигналов заднего хода, а четыре динамика, расположенные в каждом углу комнаты, и сабвуфер транслировали фоновый шум (80 дБА).

Порог обнаружения является самым низким уровнем громкости сигнала заднего хода, который едва слышен в тишине или в условиях фонового шума, в то время как порог реагирования представляет собой уровень сигнала, достаточно громкий, чтобы побудить работника повернуться к транспортному средству или покинуть опасную зону.

Эти пороги выражаются в дБА в отсутствие фонового шума или в отношении сигнал/шум (С/Ш) при его наличии. Во время измерений участникам предлагалось представить себя работающими на рабочем месте с повышенным уровнем шума в присутствии движущихся грузовых автомобилей.

При определении порога обнаружения участники должны были снизить громкость сигнала до подпорогового уровня, т.е. до уровня, при котором сигнал становился неслышимым. Затем они постепенно повышали громкость, пока сигнал не становился едва различимым в тишине или в условиях фонового шума.

Начальный уровень громкости сигнала составлял 60 дБА в отсутствие фонового шума, без средств защиты органов слуха и с использованием СИЗ в активном режиме. В условиях фонового шума, а

также без него при использовании СИЗ в пассивном режиме начальный уровень составлял 80 дБА.

В ходе измерения порога реагирования начальный уровень сигнала составлял 65 дБА для всех условий эксперимента. Участники должны были отрегулировать сигнал так, чтобы определить уровень звука, при котором он вызывает чувство опасности, намерение повернуться к грузовому автомобилю или отойти в безопасную зону.

Результаты и обсуждение. Поскольку восприятие звука в первую очередь зависит от уха, которое лучше слышит [18-20], участники были разделены на следующие группы по средней громкости чистых тонов на частотах 500, 1000 и 2000 Гц для лучшего слышащего уха:

- НС (нормальный слух): средняя громкость чистых тонов ≤ 10 дБ на всех частотах для обеих ушей ($N = 24$);
- ПС0: средняя громкость чистых тонов ≤ 10 дБ но с нарушениями слуха ($N = 2$; 1 человек с асимметричным нарушением слуха на высоких частотах и 1 человек с односторонней тугоухостью);
- ПС1: $10 \text{ дБ} <$ средняя громкость чистых тонов ≤ 20 дБ ($N = 8$);
- ПС2: $20 \text{ дБ} <$ средняя громкость чистых тонов ≤ 30 дБ ($N = 10$);
- ПС3: $30 \text{ дБ} <$ средняя громкость чистых тонов ≤ 40 дБ ($N = 3$);
- ПС4: средняя громкость чистых тонов > 40 дБ ($N = 1$).

Кривые порогов слышимости для каждой из перечисленных групп представлены на рисунке 1.

Средние пороги обнаружения в тишине для двух типов сигнализации заднего хода показаны на рисунке 2. Увеличение данного порога, обусловленное СИЗ органов слуха двух типов в пассивном режиме, одинаково для обоих сигналов, а также для людей с нормальным и нарушенным слухом. Оно достигает среднего значения в 23...26 дБ. При использовании СИЗ в активном режиме порог обнаружения сигнала в тишине снижается по сравнению с пассивным режимом примерно на 16 дБ у людей с нормальным слухом и на 25 дБ у испытуемых с нарушениями слуха (для всех типов сигнализаций и двух типов СИЗ). Примечательно, что СИЗ в активном режиме, по-видимому, снижают порог обнаружения сигнала в тишине до уровня, аналогичного уровню без применения средств защиты, по крайней мере, в группе участников с нарушениями слуха. В группе с нормальным слухом этот порог без применения защитных средств остается ниже, чем с СИЗ в активном режиме, примерно на 8 дБ. Такой результат можно объяснить шумовыми помехами, создаваемыми СИЗ при включении электронных функций.

Средние пороги обнаружения и реагирования для двух типов сигналов заднего хода в условиях фонового шума, выраженные в виде отношения сигнал/шум (С/Ш), представлены на рисунке 3.

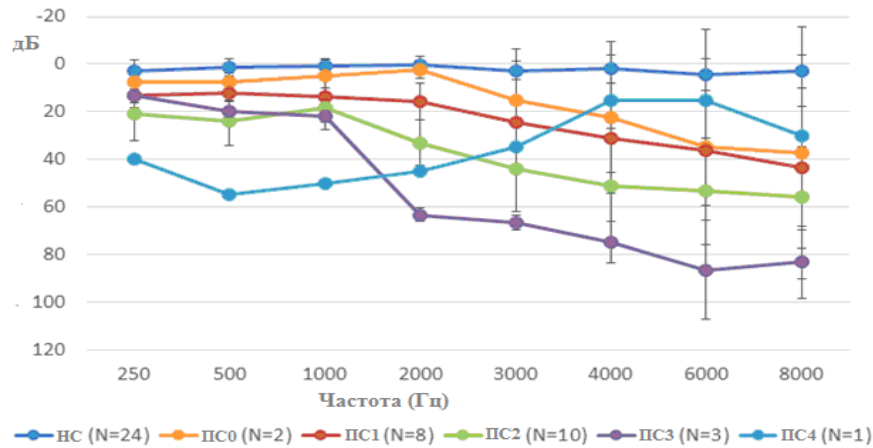


Рисунок 1 – Средние пороги слышимости для ушное слышащего уха в зависимости от частоты для различных категорий состояния слуха

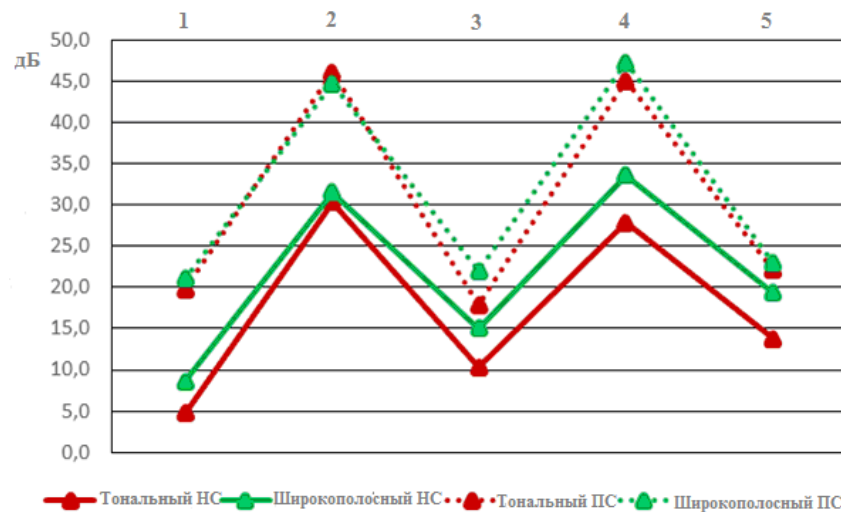


Рисунок 2 – Средние пороги обнаружения в тишине двух типов сигнализации заднего хода для двух групп участников (НС – нормальный слух, ПС – нарушения (потери) слуха): 1 – без СИЗ органов слуха, 2 – наушники в пассивном режиме, 3 – наушники в активном режиме, 4 – беруши в пассивном режиме, 5 – беруши в активном режиме

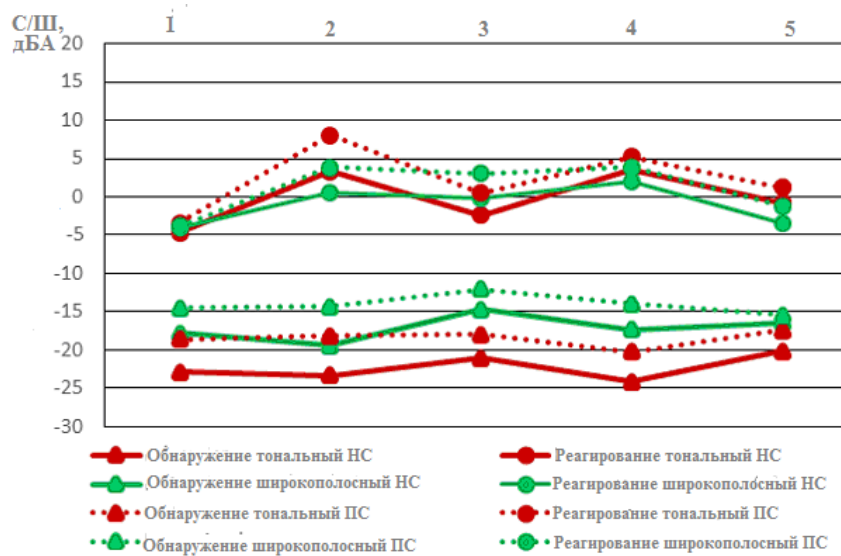


Рисунок 3 – Средние пороги обнаружения и реагирования в условиях фонового шума для двух типов сигнализации заднего хода и двух групп участников (НС – нормальный слух, ПС – нарушения (потери) слуха): 1 – без СИЗ органов слуха, 2 – наушники в пассивном режиме, 3 – наушники в активном режиме, 4 – беруши в пассивном режиме, 5 – беруши в активном режиме

Из графика следует, что среди участников с нормальным слухом средний порог обнаружения варьируется от -24,2 дБ до -20,2 дБ (в отношении сигнал/шум) для тонального сигнала и в пределах -19,4 дБ...-14,7 дБ (С/Ш) для широкополосной сигнализации. Средний порог реагирования находится в диапазоне от -4,7 дБ до 3,6 дБ для тональной сигнализации и от -4,1 дБ до 2,0 дБ для широкополосной.

Следует отметить, что пороги обнаружения варьируются в меньшей степени (среднеквадратическое отклонение составляет 3,0...5,1 дБ для тонального сигнала и 4,2...4,9 дБ для широкополосного), в то время, как среднеквадратическое отклонение значений порогов реагирования варьируется от 6,4 дБ до 9,3 дБ для тональной сигнализации и от 6,3 дБ до 8,6 дБ для широкополосной.

Средний порог обнаружения среди участников с нарушениями слуха изменяется от -20,3 дБ до -17,5 дБ (С/Ш) для тонального сигнала и от -15,4 дБ до -12,0 дБ для широкополосного. Средние значения порога реагирования находятся в диапазоне -3,4 дБ...8,0 дБ для тональной сигнализации и -3,8 дБ...3,5 дБ для широкополосной. Как и в случае с участниками с нормальным слухом, пороги обнаружения варьируются меньше.

Таким образом, пороги обнаружения звука широкополосной сигнализации в целом выше, чем тональной, тогда как пороги реагирования практически одинаковы. При этом нарушения слуха вызывают повышение порогов обнаружения и реагирования.

Кроме того, применение СИЗ органов слуха в активном режиме не всегда вызывает снижение порогов обнаружения и реагирования до уровней, которые достигаются в условиях отсутствия указанных средств защиты.

При исследовании возможности локализации сигналов заднего хода правильным ответом считалась точная идентификация положения динамика, транслирующего звуковой раздражитель. Для каждого из условий прослушивания рассчитывался процент правильных ответов (количество правильных ответов/36 трансляций 100) для тональной и широкополосной сигнализации.

Исследования показали, что средний процент правильных ответов среди всех участников ниже всего при использовании наушников в пассивном режиме и выше всего при отсутствии средств защиты органов слуха.

Среди участников с нормальным слухом средний процент правильных ответов колебался от 37,0% до 86,0% для тонального сигнала и от 75,9% до 97,4% для широкополосного. Для людей с нарушениями слуха, участвовавших в исследовании, диапазон составляет 28,4%...71,1% (тональная сигнализация) и 59,9%...94,5% (широкополосная сигнализация).

В целом, лучшие результаты были получены при использовании широкополосной сигнализации среди

людей с нормальным слухом. Кроме того, выявлено, что защитные наушники, используемые в пассивном режиме, в большей степени снижают возможность локализации сигнала заднего хода по сравнению с другими СИЗ.

Широкополосная сигнализация имеет определенные преимущества по сравнению с тональной с точки зрения обеспечения безопасности работников. То, что она имеет более высокие пороги обнаружения, но более низкие пороги реагирования, чем тональная сигнализация, является ожидаемым результатом, основанным на данных предыдущих исследований. Это можно объяснить большим маскирующим эффектом шума при обнаружении широкополосного сигнала и более разнообразным по частоте спектром широкополосной сигнализации, позволяющим быстрее среагировать на нее.

Преимущество тональной сигнализации, выявленное во время лабораторных измерений порога обнаружения, практически сводится на нет гораздо менее однородным звуковым полем позади транспортного средства в реальных производственных условиях.

Проведенными ранее исследованиями установлено, что использование средств защиты органов слуха обычно ухудшает локализацию звукового сигнала, причем в большей степени это касается наушников. Результаты данного исследования показали, что СИЗ органов слуха в активном режиме, в основном, не способствуют лучшей локализации по сравнению со средствами защиты в пассивном режиме. При этом, если и наблюдаются некоторые улучшения, то все равно возможность локализации сигнала остается ниже, чем без применения СИЗ.

Процент правильных ответов при исследовании локализации сигналов значительно варьируется в зависимости от личности участника, особенно среди людей с нарушениями слуха.

Увеличение значений порогов обнаружения (примерно на 5 дБ) у лиц с нарушениями слуха, полученное в ходе данного исследования, подтверждает результаты существующих исследований, касающихся звуковых предупреждающих сигналов в целом, особенно при использовании СИЗ органов слуха.

Несмотря на негативное влияние тугоухости на пороги обнаружения сигнала заднего хода в условиях фонового шума, результаты исследования не выявили такого влияния на пороги реагирования.

Также следует отметить, что участники настоящего исследования с нарушениями слуха в основном имеют средние пороги слышимости низких частот в пределах нормы (≤ 25 дБ). При этом, нарушения слуха наблюдаются на частотах от 2000 Гц. При таких отклонениях имеют место относительно невысокие пороги обнаружения сигналов заднего хода транспортных средств. Это также может объяснить, почему тугоухость не приводит к значительному повышению значений порогов реагирования. Такая картина (нарушения

слуха в большей степени на высоких частотах, чем на низких) как раз распространена среди работников с тугоухостью, вызванной повышенным уровнем шума или возрастом.

Выводы. Результаты исследования позволяют сделать следующие выводы.

Широкополосная сигнализация имеет определенные преимущества по сравнению с тональной, в частности, более низкие пороги реагирования (до 4 дБ) и лучшую локализацию звука (около 27%). Хотя пороги обнаружения в условиях фонового шума выше для широкополосного сигнала, это не является заметным недостатком, учитывая гораздо более равномерное распределение звука сигнализации данного типа в реальных условиях.

В целом нарушения слуха отрицательно влияют на средние пороги обнаружения в условиях фонового шума (до 5 дБ) и на локализацию звука (около 13%), при этом отмечается, что на пороги реагирования этот фактор оказывает незначительное влияние.

На основе результатов данного исследования можно предложить следующие рекомендации по использованию сигнализации заднего хода грузовых автомобилей и СИЗ органов слуха на рабочих местах с повышенным уровнем шума:

1. Предпочтение следует отдавать широкополосной сигнализации из-за ее значительного преимущества в локализации звука и, как правило, более низких порогов реагирования, в особенности при использовании средств индивидуальной защиты органов слуха.

2. Следует использовать активные СИЗ органов слуха, поскольку они позволяют значительно снизить пороги обнаружения в тишине и пороги реагирования в условиях фонового шума по сравнению с пассивными.

3. Поскольку локализация звукового сигнала имеет решающее значение с точки зрения обеспечения безопасности работников, рекомендуется использовать беруши, поскольку наушники в большей степени снижают возможность локализации.

4. При регулировании громкости сигнализации заднего хода рекомендуется учитывать следующее:

– соотношение сигнал/шум, равное 0 дБ, в опасной зоне позади автомобиля является достаточным, если рабочие не используют СИЗ органов слуха;

– для работников, использующих пассивные средства защиты органов слуха или активные СИЗ в пассивном режиме, уровень громкости сигнала должен быть отрегулирован так, чтобы отношение сигнал/шум составляло примерно 10 дБ для тональной сигнализации. Для широкополосной сигнализации этот уровень можно снизить на 3 дБ;

– при использовании СИЗ в активном режиме громкость сигнализации заднего хода должна быть установлена примерно на 5 дБ (в соотношении сигнал/шум);

– в процессе измерения фонового шума

необходимо учитывать все источники шума в производственной среде, а не только звук работающего двигателя транспортного средства, на котором установлена сигнализация.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Горшков Ю.Г., Дмитриев М.С., Старунова И.Н. Повышение эффективности транспортно-технологических процессов и улучшение условий труда работников АПК за счет инженерно-технических устройств [Текст]: монография / М.С. Дмитриев, Ю.Г. Горшков, И.Н. Старунова. – Челябинск: ЧГАА., 2010. – 291 с.

2. Горшков Ю.Г., Богданов А.В., Дмитриев М.С., Попова С.Ю. Определение уровня безопасности операторов мобильных средств сельскохозяйственного назначения [Текст] / Ю.Г. Горшков, А.В. Богданов, М.С. Дмитриев, С.Ю. Попова // Безопасность жизнедеятельности. – М., 2006 – №5. – С. 2-6.

3. Дмитриев М.С. Повышение безопасности и улучшение условий труда оператора в транспортно-технологическом процессе сельскохозяйственного производства [Текст]. Автореф. дис. ... докт. техн. наук. – Санкт-Петербург-Пушкин, 2012. – 43 с.

4. Горшков Ю.Г., Дмитриев М.С., Потемкина Д.В. Улучшение условий труда и повышение безопасности водителей автомобилей сельскохозяйственного назначения [Текст] / М.С. Дмитриев, Ю.Г. Горшков, Д.В. Потемкина // Охрана труда и техника безопасности в сельском хозяйстве. – М., 2006 – №9 – С. 17-20.

5. CSA. (2014). Protecteurs auditifs : performances, sélection, entretien et utilisation. Norme CSAZ94.2-14. Ottawa, ON : CSA. Commission de la santé et de la sécurité du travail. (2011). Revue de presse : le vendredi 9 septembre 2011. Montréal, QC : CSST.

6. Giguère, C., Laroche, C., Osman, A., Zheng, Y. (2008). Optimal installation of audible warning systems in the noisy workplace. 9th International Congress on Noise as a Public Health Problem (ICBEN) (Mashantucket, CT, p. 197-204).

7. Wilkins, P.A., Martin, A.M. The effects of hearing protectors on the perception of warning and indicator sounds: A general review. Southampton: University of Southampton, 1978.

8. Alali, K.A., Casali, J.G. (2011). The challenge of localizing vehicle backup alarms: Effects of passive and electronic hearing protectors, ambient noise level, and backup alarm spectral content. *Noise and Health*, 13(51), 99. doi: 10.4103/1463-1741.77202.

9. Alali, K., Casali, J.G. (2012). Auditory backup alarms: distance-at-first-detection via in-situ experimentation on alarm design and hearing protection effects. *Work: A Journal of Prevention, Assessment and Rehabilitation*, 41(supplement 1), 3599-3607.

10. Casali, J. G., Robinson, G. S., Dabney, E. C., Gauger, D. (2004). Effect of electronic ANR and conventional hearing protectors on vehicle backup alarm detection in noise. *Human Factors*, 46(1), 1-10.

11. Catchpole, K., Mckeown, D. (2007). A framework for the design of ambulance sirens. *Ergonomics*, 50(8), 1287-1301. doi:10.1080/00140130701318780.

12. Homer, J.P. (2008). Audible warning devices used in the mining industry. INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings. Dearborn, MI (p. 678-688).

13. Lancaster, J.A., Alali, K., Casali, J.G. (2007). Interaction of vehicle speed and auditory detection of backup alarms AKA: Can the construction worker get out of the way? Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 51(20), 1421-1424. doi: 10.1177/154193120705102010.

14. Laroche, C., Ross, M.-J., Lefebvre, L., Larocque, R. (1995). Détermination des caractéristiques optimales des alarmes de recul. (Rapport no R-117). Montréal, QC: IRSST.

15. Lovejoy, S.M. (2008). Determination of backup alarm masked threshold in construction noise (Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA).

16. May, K.R., Walker, B.N. (2017). The effects of distractor sounds presented through bone conduction headphones on the localization of critical environmental sounds. *Applied Ergonomics*, 61, 144-158. doi:10.1016/j.apergo.2017.01.009.

17. McKinley, R.L. (2000). Communication and localization with hearing protectors. *Damage Risk from Impulse Noise*, Aberdeen, MD.

18. Цой Д.Д., Хилько Е.А., Арутюнян Т.В. и др. Изучение

частоты слияния и верхнего порога слышимости методом аудиометрии [Текст] / Д.Д. Цой, Е.А. Хилько, Т.В. Арутюнян и др. // Актуальные вопросы биомедицинской инженерии. Материалы V Всероссийской научной конференции. Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. 2015, Изд-во: Прондо. – С. 203-206.

19. Бобошко М.Ю., Бердникова И.П. и др. Психо-акустические методы в диагностике центральных нарушений слуха при сенсоневральной тугоухости [Текст] / М.Ю. Бобошко, И.П. Бердникова и др. // Российская отоларингология. – С-Пб., 2017 - №2 (87) – С. 9-6.

20. Глинов Д.В. Аудиометрические методы диагностики состояния слухового анализатора [Текст] / Д.В. Глинов, Д.П. Юсупов, Л.Ф. Добро // Современное состояние и приоритеты развития фундаментальных наук в регионах: труды X Всерос. науч. конф. молодых ученых и студентов: в 2 т. – Краснодар: Просвещение-Юг, 2013. – Т.1. – С. 36-38.

Статья поступила в редакцию 30.09.2023

Статья принята к публикации 15.12.2023

УДК 519.876.5

EDN: CEYUSK

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ К РАЗРАБОТКЕ СХЕМЫ
ЭВАКУАЦИИ ПРИ ПОЖАРЕ**

© Авторы 2023

SPIN: 4702-5955

AuthorID: 618777

ORCID: 0000-0002-5531-3579

ResearcherID: F-2232-2018

ScopusID: 57212562000

АВДЕЕВА Марина Олеговна, кандидат экономических наук,
доцент высшей школы техносферной безопасности*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого**(195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, e-mail: avdeeva_mo@spbstu.ru)*

SPIN: 8180-9072

AuthorID: 535992

ORCID: 0000-0001-8572-4697

ResearcherID: R-1013-2017

ScopusID: 57205428646

БЫЗОВ Антон Прокопьевич, кандидат технических наук,
доцент высшей школы техносферной безопасности*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого**(195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, e-mail: byzov_ap@spbstu.ru)*

SPIN: 8467-5126

AuthorID: 671259

ORCID: 0000-0002-9849-3995

ResearcherID: AAF-6826-2021

ScopusID: 57209226546

КЛИМОВА Ирина Викторовна, кандидат технических наук,
доцент высшей школы техносферной безопасности*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого**(195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, e-mail: klimova_iv@spbstu.ru)*

SPIN: 8286-5957

AuthorID: 805309

ORCID: 0000-0002-0567-3875

ResearcherID: Q-4441-2017

ScopusID: 57205428468

ДОРОНИН Александр Сергеевич, ассистент высшей школы техносферной безопасности
*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого**(195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, e-mail: doronin_as@spbstu.ru)*

Аннотация. В наше время спортивные сооружения становятся все более популярными и востребованными. Однако, несмотря на их пользу и преимущества, в них также существует риск возникновения пожаров. Каждый год в спортивных объектах происходит значительное количество пожаров, что может приводить к серьезным последствиям для жизни и здоровья людей. Многие из этих сооружений находятся в густонаселенных районах, что увеличивает вероятность трагических последствий. Поэтому безопасность на спортивных объектах является очень важной проблемой, требующей постоянного внимания. Целью данного исследования является разработка имитационной модели существующего фитнес клуба. Выделены задачи: 1) проанализировать состояние пожарной безопасности в фитнес клубах на текущий момент времени, 2) на основе полученных результатов эксперимента оценить целесообразность переноса раздевалки фитнес клуба во второго этажа на первый, 3) разработать проект напольной схемы эвакуации. С использованием программного продукта *Anylogic* реализована модель фитнес клуба, на которой проведен эксперимент по переносу местоположения раздевалки. Анализ полученных результатов лег в основу разработки напольной схемы эвакуации при пожаре.

Ключевые слова: эвакуация, пожар, анализ и оценка, управление безопасностью жизнедеятельности, моделирование рисков, моделирование, техносферная безопасность, *AnyLogic*.

**APPLICATION OF SIMULATION MODELING METHODS TO THE
DEVELOPMENT OF AN EVACUATION SCHEME IN CASE OF FIRE**

© Автор(s) 2023

AVDEEVA Marina Olegovna, phd (economic), associate professor of Higher School of Technospheric Safety

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
 (195251, Russia, St. Petersburg, Polytechnic St., 29, e-mail: avdeeva_mo@spbstu.ru)
BYZOV Anton Prokopievich, phd (technical), associate professor of Higher School of Technospheric Safety
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
 (195251, Russia, St. Petersburg, Polytechnic St., 29, e-mail: byzov_ap@spbstu.ru)
KLIMOVA Irina Viktorovna, phd (technical), associate professor of Higher School of Technospheric Safety
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
 (195251, Russia, St. Petersburg, Polytechnic St., 29, e-mail: klimova_iv@spbstu.ru)
DORONIN Alexander Sergeevich, assistant at the Higher School of Technosphere Security
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
 (195251, Russia, St. Petersburg, Polytechnic St., 29, e-mail: doronin_as@spbstu.ru)

Abstract. Nowadays, sports facilities are becoming more and more popular and in demand. However, despite their benefits and advantages, there is also a risk of fires in them. Every year, a significant number of fires occur in sports facilities, which can lead to serious consequences for people's lives and health. Many of these structures are located in densely populated areas, which increases the likelihood of tragic consequences. Therefore, safety at sports facilities is a very important issue that requires constant attention. The purpose of this study is to develop a simulation model of an existing fitness club. The tasks are highlighted: 1) analyze the state of fire safety in fitness clubs at the current time, 2) based on the results of the experiment, evaluate the feasibility of transferring the locker room of the fitness club from the second floor to the first, 3) develop a draft floor evacuation scheme. Using the *Anylogic* software product, a fitness club model was implemented, on which an experiment was conducted to transfer the location of the locker room. The analysis of the obtained results formed the basis for the development of a floor evacuation scheme in case of fire.

Keywords: evacuation, fire, analysis and assessment, life safety management, risk modeling, modeling, technosphere safety, *AnyLogic*.

Авдеева М.О. Применение методов имитационного моделирования к разработке схемы эвакуации при пожаре / М.О. Авдеева, А.П. Бызов, И.В. Климова, А.С. Доронин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 12. – № 4(64). – С. 215-221. – EDN: CEYUSK.

Введение. В настоящее время спортивные комплексы имеют большую популярность и востребованность. В них ежедневно собирается большое количество посетителей. Однако, статистика свидетельствует, что каждый год в подобных объектах происходит большое количество пожарных ситуаций, что может приводить к серьезным последствиям и опасностям для жизни и здоровья людей.

Исходя из статистических данных Министерст-

ва Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий [1-5] тенденция по пожарным ситуациям в спортивных комплексах остается неутешительной.

За последние пять лет количество пожаров на подобных объектах увеличилось, кроме того, отмечается большое число жертв и пострадавших (табл. 1).

Таблица 1 – Сведения о пожарах в спортивных учреждениях с 2017 по 2021 г.

	Год	Кол-во пожаров, ед.	Погибло людей, чел.	Травмировано людей, чел.	Прямой ущерб, млн руб.
1	2017 год	1853	28	38	66,74
2	2018 год	2061	22	35	97,79
3	2019 год	2513	14	37	147,39
4	2020 год	3200	22	48	111,48
5	2021 год	2902	30	33	88,08

Исходя из приведенных сведений, выявляется необходимость повышения уровня пожарной безопасности в спортивных комплексах и авторами статьи решение этой проблемы видится в применении информационных технологий, в частности таких, как имитационное моделирование.

Построение имитационных моделей и проведение экспериментов на них является выгодным мероприятием. Поскольку позволяет сократить материальные и временные затраты на исследование. Это касается и спортивных комплексов. В результате применения имитационного моделирования можно построить наиболее оптимальные маршруты

для эвакуации и эффективные планы действий.

Кроме того, проведение экспериментов на имитационной модели спортивного комплекса позволит оценить влияние на эвакуацию различных факторов, таких как: 1) расположение эвакуационных выходов, 2) наличие препятствий, 3) количество людей в помещении и т.д. Это позволит разработать более эффективную схему напольной эвакуации и улучшить оповещение людей при пожарной ситуации.

Исследованиями, посвященными имитационному моделированию пожарной эвакуации в зданиях, занимаются многие отечественные ученые [6-15]. В частности, В.А. Сироткин [16] и его

единомышленники [17,18] провели исследование применения имитационного моделирования для анализа процесса эвакуации в зданиях. Результаты показали, что имитационное моделирование может быть эффективным инструментом для анализа и оптимизации процесса эвакуации, а также для оценки безопасности людей при пожарах. А так же, Д.Е. Дмитриев [19] и его соавторы представили результаты исследования использования программного обеспечения *AnyLogic* для имитационного моделирования эвакуации людей при пожаре в торговом центре. Было проведено моделирование эвакуации с использованием различных стратегий, таких как эвакуация через ближайший выход, эвакуация через выход, находящийся в определенном направлении, и эвакуация через наиболее безопасный выход. Анализ результатов показал, что использование программного обеспечения *AnyLogic* позволяет оптимизировать процесс эвакуации, снизить риски для людей и повысить эффективность работы служб спасения. Еще одним примером исследования, посвященного имитационному моделированию пожарной эвакуации, является работа Н.Н. Разуваевой [20]. Авторами статьи было проведено моделирование эвакуации на основе технологии имитационного моделирования *AnyLogic* с учетом особенностей здания. Были использованы данные о скоростных характеристиках людей в зависимости от их возраста и пола, а также о расположении дверей, проемов и

других элементов здания. Результаты моделирования показали, что имитационное моделирование может быть эффективным инструментом для оптимизации планирования эвакуации и повышения безопасности людей в случае пожара.

Исходя из представленной информации, авторами статьи была поставлена задача исследования, которая заключается в разработке имитационной модели существующего фитнес клуба. На разработанной модели планируется провести ряд экспериментов, один из которых заключается в переносе раздевалки со второго этажа на первый. Планируется на основе имитационной модели оценить последствия данного решения. А также разработать наполняющую схему эвакуации.

Методология. В данной статье для создания имитационной модели будет использован программный продукт *Anylogic*. *Anylogic* – пакет для имитационного моделирования различных процессов. Данная программа разработана российской компанией «Экс Джей Текнолоджис».

Для моделирования эвакуации из здания необходимо использовать пешеходную библиотеку, которая состоит из блоков и позволяет моделировать процессы с помощью специальной диаграммы. Эти блоки играют важную роль в задании логики движения потока людей, что является основой моделирования любого процесса. Основные блоки представлены на рисунке 1.











	PedSource	Создает пешеходов. Как правило, используется в качестве начального блока диаграммы процесса.
	PedSink	Уничтожает пешеходов. Этим блоком чаще всего завершается диаграмма процесса.
	PedGoTo	Направляет пешеходов к заданной цели.
	PedService	Имитирует обслуживание пешеходов в сервисах.
	PedWait	Заставляет пешеходов ожидать в течение заданного времени в заданном месте.
	PedSelectOutput	Распределяет входящих пешеходов между пятью выходными портами в зависимости от заданных соотношений или условий.
	PedEnter	Размещает пешеходов в моделируемом пространстве.
	PedExit	Удаляет пешеходов из моделируемого пространства.
	PedEscalator	Имитирует движение пешеходов по эскалатору.
	PedChangeLevel	Перемещает пешеходов на другой уровень.

Рисунок 1 – Блоки пешеходной библиотеки

В качестве объекта моделирования выбрано здание фитнес клуба, которое было воссоздано с помощью технических планов в программе *Anylogic*. Этот фитнес клуб расположен на двух этажах и имеет подвал. Здание также примыкает к существующему жилому зданию.

В организации работает 24 человека, которые обеспечивают комфортный и безопасный сервис для

посетителей. Хотя у здания нет конкретного времени работы, персонал всегда начинает свой рабочий день в 8 утра, чтобы подготовиться к приему огромного числа посетителей. Здание способно вместить до 166 человек одновременно, поэтому необходимо подготовить соответствующее количество оборудования и персонала для обеспечения качественного сервиса (рис. 2).

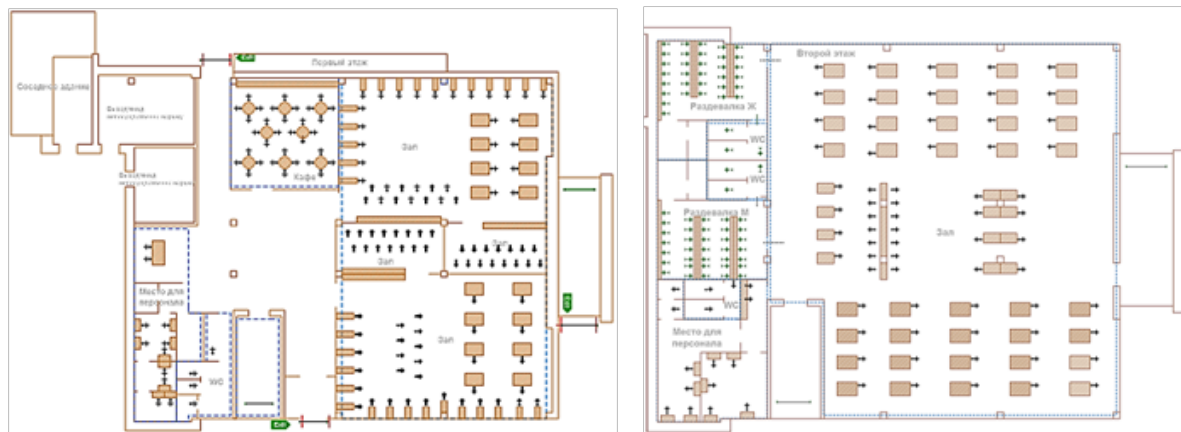


Рисунок 2 – Имитационная модель 1 и 2 этажей здания фитнес клуба

Результаты. Проведение эксперимента с переносом раздевалки на первый этаж позволит определить, как это изменение влияет на время и эффективность эвакуации, а также на распределение плотности людей в здании. Результаты могут быть полезны для оптимизации проектирования зданий и планирования эвакуации, что может способствовать улучшению безопасности всех находящихся внутри здания людей в случае чрезвычайных ситуаций.

В модели были внесены изменения, которые заключались в перемещении раздевалок на первый этаж, а также в том, что пустые помещения, пред-

назначенные для занятий спортом, теперь расположены на втором этаже. Для проведения эксперимента сохраняем прежнюю логику движения людей, за исключением того, что теперь на первом этаже часть людей будет использовать ближайший эвакуационный выход, ранее не использованный, так как данный выход находится близко к раздевалкам. Состояние модели до подачи сигнала «Пожар!» представлено на рисунке 3.

В здании в данный момент 185 человек, время 14:54. На рисунке 4 представлены результаты эксперимента.

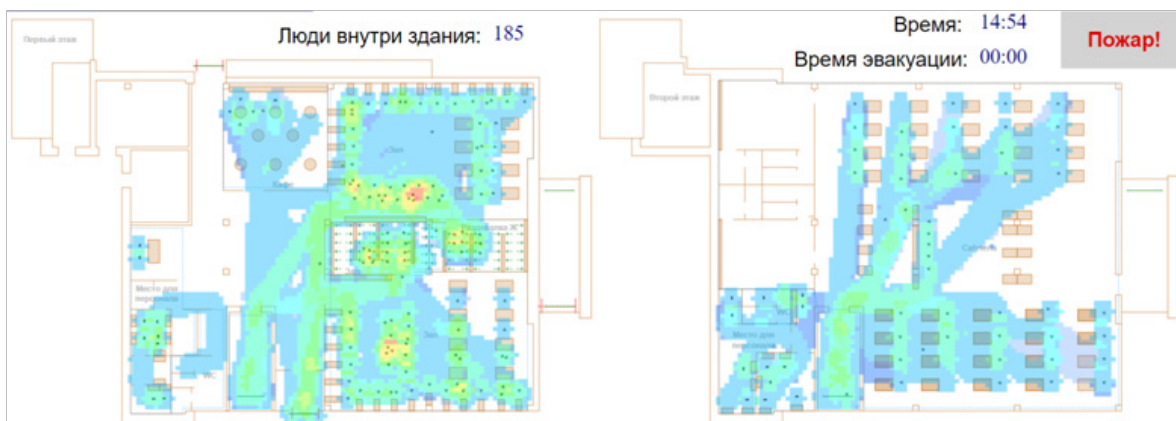


Рисунок 3 – Эксперимент. Состояние модели до начала эвакуации

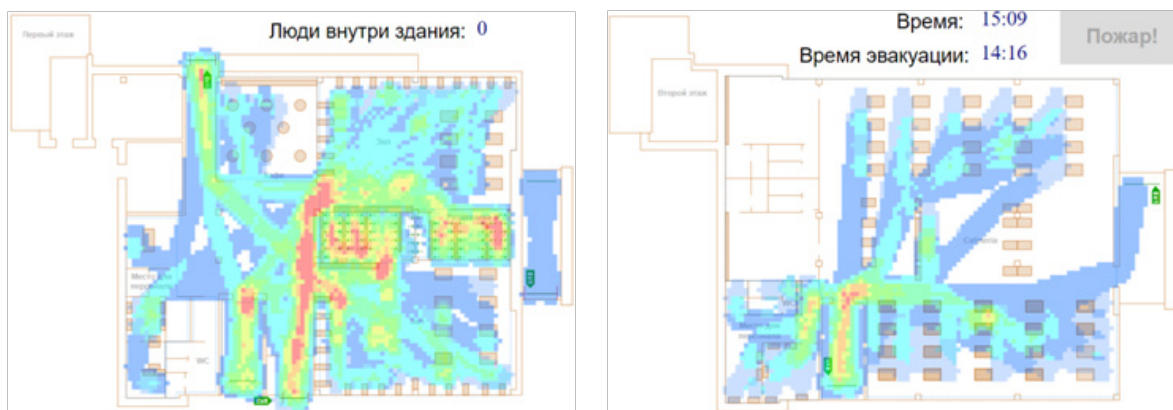


Рисунок 4 – Эксперимент. Состояние модели после эвакуации

Большая плотность располагается на 1 этаже, в коридоре на пути к главному выходу из здания. Дополнительный выход так же используется, но в меньшем количестве людей, так как многие про него не знают и в состоянии паники выходят через тот же выход, через который заходили первоначально в здание.

Из графиков на рисунках 5 и 6 можно сделать несколько важных заключений. Во-первых, средняя продолжительность эвакуации существенно уменьшилась по сравнению с результатом эксперимента на модели реального объекта, что говорит о том, что перенос раздевалки и создание

дополнительного выхода действительно оказали положительное влияние на процесс эвакуации. Среднее время эвакуации сократилось: в эксперименте с моделью раздевалки на первом этаже оно составляло 6,85, а теперь – 4,68 минуты что является значительным улучшением. Во-вторых, динамика количества людей в здании также изменилась после перестройки модели. Видно, что на начальном этапе, до сигнала «Пожар!», количество людей в здании было примерно одинаковым в разных зонах. Можно отметить большую плотность посетителей, направляющихся к дополнительному выходу, расположенному на первом этаже.

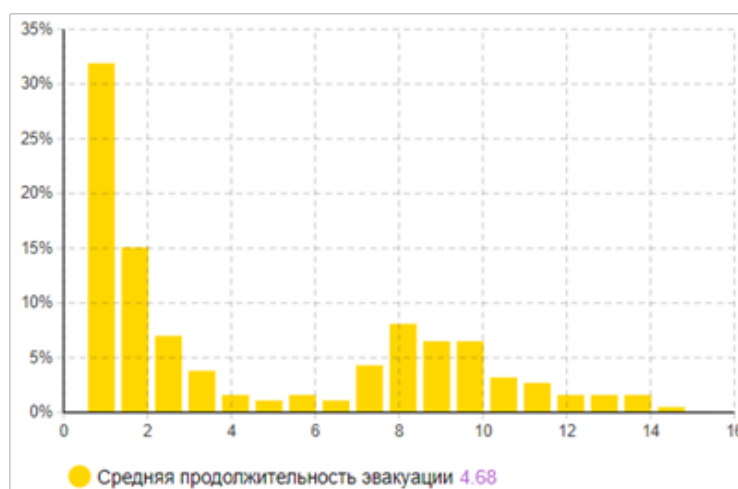


Рисунок 5 – Эксперимент. График средней продолжительности эвакуации

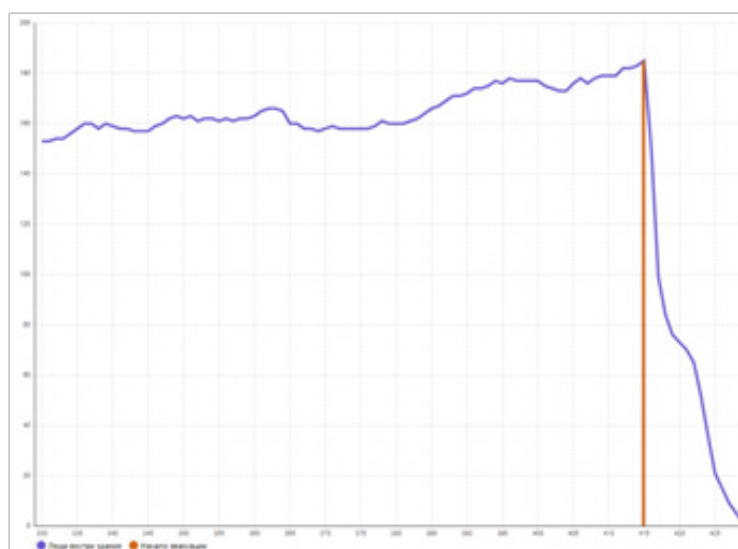


Рисунок 6 – Эксперимент. Динамика количества людей в здании

Обсуждение. Проанализировав полученные результаты эксперимента, можно сделать вывод о целесообразности переноса раздевалки фитнес клуба на первый этаж помещения.

Исходя из результатов, все же остаются посетители, которые сложно ориентируются в пространстве или не знают о наличии запасного пожарного выхода.

В качестве основного результата работоспо-

собности модели получена карта плотности посетителей при эвакуации. При анализе данной карты авторами статьи был сделан вывод, что люди выбирают для эвакуации главный выход из здания. Это может быть обусловлено тем, что люди стремятся использовать выход, в который заходили или не знают о наличии другого. Исходя из этих соображений и полученных результатов, авторами статьи предложено решение, заключающееся в

разработке и нанесении на пол схемы эвакуации (рис. 7), на которой будут указаны направления к эвакуационным выходам.

Данное решение позволит повысить осведом-

ленность посетителей о существовании и расположении эвакуационных выходов, а также тратить меньше времени на ориентацию в пространстве в случае паники и выбрать оптимальный маршрут.

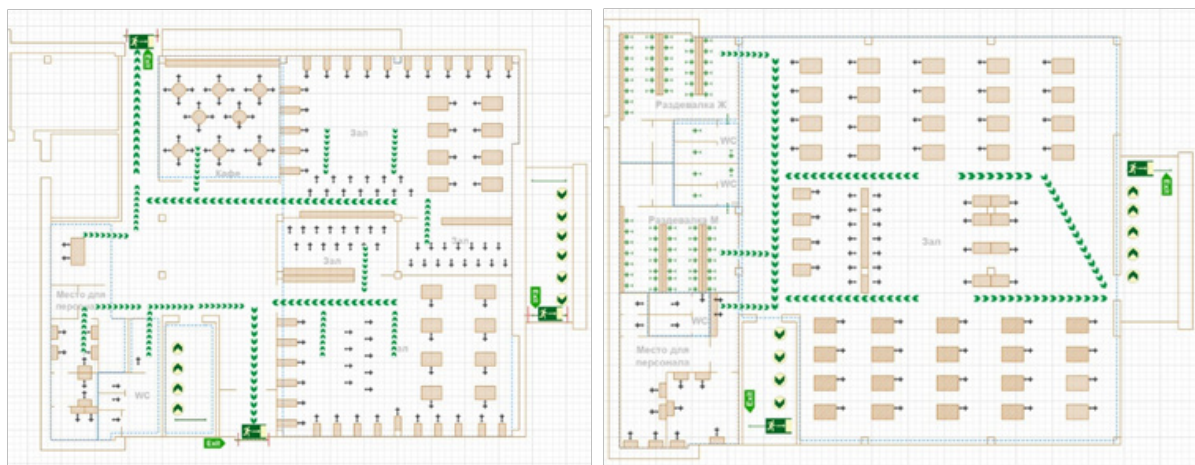


Рисунок 7 – Схема эвакуации на 1 и 2 этаже

Выводы. В заключение можно сделать следующие выводы:

1. Разработана имитационная модель фитнес клуба.
2. Проведен эксперимент по переносу раздевалки в имитационной модели со второго этажа на первый.
3. Проанализированы результаты эксперимента.
4. На основе результатов проведенного эксперимента разработана схема напольной разметки для эвакуации людей из здания.

Разработанная имитационная модель послужила основной для проведения эксперимента по переносу раздевалки со второго этажа фитнес клуба на первый. Результаты эксперимента позволили оценить положительный эффект данного решения.

В России применение технологии имитационного моделирования и разметки на полу может оказаться особенно важным в зданиях с массовым пребыванием людей, таких как торговые центры, стадионы, аэропорты и другие общественные места. В случае чрезвычайных ситуаций, таких как пожар или теракт, быстрая и эффективная эвакуация людей может спасти множество жизней. Поэтому внедрение таких технологий должно стать приоритетной задачей для компетентных органов и представителей бизнеса, ответственных за безопасность людей в зданиях с массовым пребыванием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Полевин П.В., Козлов А.А., Чебуханов М.А., Матюшин Ю.А., Фирсов А.Г., Сибирко В.И., Четчина Т.А., Гончаренко В.С. // Пожары и пожарная безопасность в 2017 году: статистический сборник. М.: ВНИИПО, 2018. – 125 с.
2. Полевин П.В., Чебуханов М.А., Долаков Т.Б., Козлов А.А., Матюшин Ю.А., Фирсов А.Г., Сибирко В.И., Гончаренко В.С., Четчина Т.А. // Пожары и пожарная безопасность в 2018 году: статистический сборник. Под общей редакцией Гордиенко Д.М. М.: ВНИИПО, 2019. – 125 с.
3. Полевин П.В., Чебуханов М.А., Долаков Т.Б., Козлов

- А.А., Матюшин Ю.А., Фирсов А.Г., Сибирко В.И., Гончаренко В.С., Четчина Т.А. // Пожары и пожарная безопасность в 2019 году: статистический сборник. Под общей редакцией Гордиенко Д.М. М.: ВНИИПО, 2020. – 80 с.
4. Полевин П.В., Чебуханов М.А., Козлов А.А., Фирсов А.Г., Сибирко В.И., Гончаренко В.С., Четчина Т.А. // Пожары и пожарная безопасность в 2020 году: статистический сборник. Под общей редакцией Гордиенко Д.М. М.: ВНИИПО, 2021. – 112 с.
5. Гончаренко В.С., Четчина Т.А., Сибирко В.И., Мартемьянов С.И., Надточий О.В. (ФГБУ ВНИИПО МЧС России); Полевин П.В., Козлов А.А., Чебуханов М.А. (ДНПР МЧС России); Рецензент д-р техн. наук, проф. Соколов С.В. (Академия ГПС МЧС России) // Пожары и пожарная безопасность в 2021 году: статистический сборник. Балашиха: П 46 ФГБУ ВНИИПО МЧС, 2022. – 114 с.
6. Степанов, Н. А., Коржикова, О. И. (2018). Имитационное моделирование пожарной эвакуации в зданиях на основе метода многокритериальной оптимизации. Вестник Казанского технологического университета, 21(22). 77-81.
7. Холщевников В. В., Самошин Д. А., Парфененко А. П. Эвакуация и поведение людей при пожарах: учеб. пособие. – М.: Академия ГПС МЧС России. – 2015. – 262 с.
8. Avdeeva M.O., Savelev D.I., Uzun O.L., Logvinova U.V. Model of settlement evacuation based on the imitation modelling application // В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 8. Сер. "VIII International Scientific Conference Transport of Siberia 2020" 2020. С. 012076.
9. Avdeeva M., Uzun O., Borodkina Y. Simulation of the evacuation process at various economic facilities using the anylogic software product // В сборнике: E3S Web of Conferences. 13. Сер. "13th International Scientific and Practical Conference on State and Prospects for the Development of Agribusiness, INTE-RAGROMASH 2020" 2020. – С. 11031.
10. Avdeeva M., Byzov A., Smyshlyaeva K., Leonova N. Assessment of the fire situation of a certain building using fenix+ // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2021. Т. 1259. С. 391-400.
11. Nikolova, M., Ronchi, E. (2021). Investigating the impact of information provision on evacuation behavior using an agent-based modeling approach. Safety Science, 139, 105236
12. Jiang, Y., Zhang, J., & Huang, L. (2021). An improved fire evacuation simulation model considering crowd behavior and multiple exits. Cluster Computing, 24(4). 11197-11208.
13. Jiang, Y., Zhang, J., & Huang, L. (2021). Fire evacuation simulation model for crowded public places. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 12(8). 8431-8440.
14. Paulsen, J. R., Nilsson, D., & Johansson, A. (2018). Si-

mulating human response during fire evacuation: A review of the literature. *Fire Technology*, 54(2), 441-474.

15. Thompson, P., Galea, E., & Lawrence, P. (2016). A review of building evacuation models. *Fire Technology*, 52(3), 679-707.

16. Моделирование эвакуации людей с ограниченными возможностями из многоквартирного дома / Шамсутдинов, А.М. и др. *Вестник Казанского технологического университета*. – 2019. – 22(3). 70-76.

17. Боровских, А.В. и др. (2014). Моделирование пожарной эвакуации в зданиях с использованием программного комплекса "Pathfinder". *Вестник НГТУ*, 51(1). 94-100.

18. Сироткин В.А., Киселев В.Ю., Горелова Ю.В. Имитационное моделирование процесса эвакуации при пожаре в зданиях // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия "Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника"*. – 2011. – Т. 11. – № 2. – С. 67-71.

19. Дмитриев Д.Е., Костенко А.В., Колесова Е.А. Имитационное моделирование процесса эвакуации людей при пожаре в торговом центре с использованием AnyLogic // *Известия Томского политехнического университета*. – 2014. – Т. 325. – № 5. – С. 63-67

20. Разуваева Н.Н. Имитационное моделирование процесса пожарной эвакуации на основе технологии AnyLogic // *Информатика и системы управления*. – 2018. – № 3. – С. 40-47.

Статья поступила в редакцию 10.10.2023

Статья принята к публикации 15.12.2023

УДК 622.276.55;613.64

EDN: DQRYMB

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ТРУДА РАБОТНИКОВ, ЗАНЯТЫХ ПРИ ТЕРМОШАХТНОЙ ДОБЫЧЕ ВЫСОКОВЯЗКОЙ НЕФТИ

© Автор(ы) 2023

SPIN: 5889-7498

AuthorID: 1216440

ORCID: 0000-0002-3144-980X

ResearcherID: ADD-4078-2022

ScopusID: 57222538745

МЯКОВ Владислав Владимирович, аспирант

Санкт-Петербургский горный университет

(199106, Россия, Санкт-Петербург, линия 21-я В.О., дом 2, e-mail: s215061@stud.spmi.ru)

SPIN: 5251-6351

AuthorID: 352624

ORCID: 0000-0003-2074-9695

ResearcherID: AAI-1662-2019

ScopusID: 57196279711

КОРШУНОВ Геннадий Иванович, доктор технических наук,

профессор кафедры «Безопасности производств»

Санкт-Петербургский горный университет

(199106, Россия, Санкт-Петербург, линия 21-я В.О., дом 2, e-mail: korshunov_gi@pers.spmi.ru)

SPIN: 2019-9138

AuthorID: 925827

ORCID: 0000-0001-7580-9099

ResearcherID: 3145740

ScopusID: 57202790867

КАБАНОВ Евгений Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Безопасности производств»

Санкт-Петербургский горный университет

(199106, Россия, Санкт-Петербург, линия 21-я В.О., дом 2, e-mail: kabanov_ei@pers.spmi.ru)

Аннотация. В статье указаны перспективы применения термошахтной технологии в будущем, приведены ее преимущества в сравнении с традиционными способами добычи нефти. Приведены сводные результаты специальной оценки условий труда на рабочих местах персонала, занятого при добыче нефти шахтным способом. Перечислены основные вредные и опасные производственные факторы, характерные для термошахтной технологии. Проведено сравнения уровней воздействия вредных и опасных производственных факторов с нормативными значениями и описаны синергетические эффекты, возникающие между ними. Приведен анализ профессиональной заболеваемости персонала на примере действующих в Российской Федерации нефтяных шахт и выявлены ключевые вредные производственные факторы. Приведен анализ статистических данных травматизма и аварийности на нефтяных шахтах Российской Федерации и определены коренные причины травматизма среди персонала, а также возникновения аварийных ситуаций. В заключении указаны приоритетные проблемы в области охраны труда и промышленной безопасности, для которых характерна специфика, присущая технологии шахтной добычи нефти.

Ключевые слова: охрана труда, нефтяная шахта, анализ профессионального риска, термошахтная технология, вредные и опасные производственные факторы, профессиональные заболевания, травматизм, аварийность.

ANALYSIS OF WORKING CONDITIONS OF EMPLOYEES ENGAGED IN THERMAL SHAFT EXTRACTION OF HIGH-VISCOSITY OIL

© The Author(s) 2023

MIAKOV Vladislav Vladimirovich, post-graduate student

Saint Petersburg Mining University

(199106, Russia, St Petersburg, 21st line, 2, e-mail: s215061@stud.spmi.ru)

KORSHUNOV Gennadiy Ivanovich, doctor of technical sciences,

professor of the Department of «Production Safety»

Saint Petersburg Mining University

(199106, Russia, St Petersburg, 21st line, 2, e-mail: e-mail: korshunov_gi@pers.spmi.ru)

KABANOV Eugeny Igorevich, candidate of technical sciences,

associate professor of the Department of «Production Safety»

Saint Petersburg Mining University

(199106, Russia, St Petersburg, 21st line, 2, e-mail: kabanov_ei@pers.spmi.ru)

Abstract. The article indicates the prospects of thermal shaft technology application in the future, its advantages in comparison with traditional methods of oil production are given. The article summarizes the results of a special assessment of working conditions at the workplaces of personnel engaged in oil production by the shaft method. The main harmful and hazardous production factors characteristic for thermal shaft technology are listed. The levels of exposure of harmful and hazardous production factors are compared with the normative values and the synergetic effects arising between them are described. The analysis of occupational morbidity of personnel on the example of oil mines operating in the Russian Federation is given and the key harmful production factors are identified. The analysis of statistical data on injuries and accidents at oil mines in the Russian Federation is given and the root causes of injuries among personnel and emergencies are identified. The conclusion indicates the priority problems in the field of occupational health and safety, which are characterized by the specifics inherent in the technology of mine oil production.

Keywords: labor protection, oil mine, occupational risk analysis, thermal shaft technology, harmful and hazardous production factors, occupational diseases, injuries, accident rate.

Мяков В.В. Анализ условий труда работников, занятых при термошахтной добыче высоковязкой нефти / В.В. Мяков, Г.И. Коршунов, Е.И. Кабанов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 12. – № 4(64). – С. 222-228. – EDN: DQRYMB.

Введение. По различным оценкам разведанных в Российской Федерации запасов нефти при уровне добычи 500 млн. т. в год будет достаточно на срок до 50 лет [1, 2]. При этом в первую очередь отрабатываются запасы легкой нефти, сокращение которых приведет к увеличению объемов добычи высоковязких нефтей (разведанные запасы которых на территории России достигают 35 млрд. тонн) [2, 3]. В связи с этим разработка месторождений тяжелых и битуминозных нефтей обладает высокой актуальностью в будущем [2, 4]. В настоящее время в России функционируют 3 нефтяные шахты, разрабатывающие Ярегское месторождение высоковязкой нефти с использованием термошахтной технологии.

В силу своих физических свойств – в первую очередь высоких плотности и вязкости, тяжелая нефть не может быть извлечена из недр традиционными методами, в связи с чем для ее добычи применяются шахтные технологии добычи [5, 6]. Здесь одной из наиболее перспективных технологий добычи является термошахтная технология, суть которой заключается в нагнетании горячего пара в нефтяной пласт для уменьшения вязкости и повышения подвижности нефти, извлечении нефти через пробуренные из горных выработок подземные скважины, сборе нефти в выработках и ее выдаче на поверхность с помощью насосов. Преимуществами термошахтного метода добычи нефти являются высокие показатели интенсивности добычи и коэффициента извлечения нефти (КИН) $>0,6$. Более высокие по сравнению с традиционными способами добычи значения показателя КИН делает актуальным использование термошахтной технологии для повторной разработки ранее отработанных месторождений [7].

Термошахтная технология сочетает в себе особенности подземной разработки месторождений и элементы традиционного способа добычи нефти, что формирует специфический набор опасностей для обслуживающего персонала. Уникальность термошахтной технологии и непродолжительный по

сравнению с традиционными способами добычи опыт ее эксплуатации требует пристального внимания к сопутствующим ей вредным и опасным производственным факторам (ВПФ и ОПФ). Систематизация данных об условиях труда позволит разрабатывать необходимые для управления профессиональными рисками мероприятия, а также обеспечивать требуемый уровень охраны труда в условиях прогнозируемого увеличения числа нефтяных месторождений, отрабатываемых с применением шахтного метода. Изучение структуры опасных и вредных производственных факторов, а также дальнейшая разработка защитных мероприятий должны основываться на анализе актуальных данных о профессиональной заболеваемости, травматизме и аварийности, накопленных в ходе эксплуатации действующих нефтяных шахт.

Методология. Методология настоящего исследования заключается в проведении научного обзора на тему анализа воздействия ВОПФ на персонал, занятый при добыче нефти шахтным способом, а также в систематизации полученных данных с целью выявления наиболее приоритетных направлений повышения безопасности труда. В частности, в ходе анализа выполнялось сопоставление фактических показателей ВОПФ с параметрами, определяющими результат их негативного воздействия в виде степени вероятности профессиональной заболеваемости и травматизма (в том числе возникающим за счет возникновения аварий).

Так, в ходе анализа были проанализированы условия труда персонала нефтешахт Ярегского месторождения, занятого на участках проходки и расширения горных выработок. При этом было установлено, что существующая здесь специфическая производственная среда формирует значительные трудности не только для контроля и управления технологическими процессами, но и на рабочих местах обслуживающего персонала с присутствующим воздействием комплекса ВПФ и ОПФ, который не имеет аналогов в других отраслях промышленности. Среди них следует выделить:

- нагревающий микроклимат;
- производственный шум;
- локальная и общая вибрация;
- аэрозоли преимущественно фиброгенного действия (АПФД);
- химический фактор (содержание химических веществ в воздухе);
- тяжесть труда;
- опасность обвалов;
- опасности, связанные с пожарами и т. д.

Кроме того, для достижения целей исследования были изучены результаты СОУТ, согласно которым рабочие места подземных горнорабочих Ярегского месторождения чаще всего относятся к третьему

классу опасности, что свидетельствует о ВПФ и (или) ОПФ, уровни воздействия которых превышают установленные нормативы. Общее количество рабочих мест на данном предприятии – 436, из которых на 359 выявлено наличие ВПФ и (или) ОПФ с уровнями воздействия, превышающими установленные нормативы. К профессиям с наиболее высокими классами опасности условий труда относятся профессии проходчика, крепильщика, оператора добычи нефти и газа, машиниста горных выемочных машин, машиниста буровых установок [8].

В таблице 1 представлены ВПФ и (или) ОПФ, идентифицированные на рабочих местах.

Таблица 1 – Вредные и (или) опасные производственных факторы на рабочих местах [8]

Вредный и/или опасный производственный фактор	Химическое воздействие	Аэрозоли преимущественно фиброгенного действия	Шумовое воздействие	Вибрация	Микроклимат	Тяжесть труда
Кол-во мест, на которых выявлены ВОПФ	96	77	341	63	78	179

Результаты. Наиболее часто встречающимися производственными факторами являются шум (41%) и тяжесть труда (21%). Повышенный уровень шума (среднее значение $89,3 \pm 6,2$ дБ [9]) наблюдается на рабочих местах, связанных с проходческими работами. Основными источниками шума здесь являются отбойные молотки, перфораторы, комбайны, вентиляторы, другие машины и механизмы. Средние значения уровней вибрации, создаваемой используемым оборудованием, составляют $131,4 \pm 1,2$ дБ для локальной вибрации и $108,2 \pm 3,1$ дБ для общей вибрации [9].

Условия повышенной тяжести труда чаще всего встречаются у рабочих, занятых при перемещении грузов со сверхнормативными массами ручным способом, а также у специалистов среднего звена по причине использования ими большого количества контрольно-измерительных приборов на протяжении рабочей смены. Усредненные значения показателей тяжести труда: по параметру «общая статическая нагрузка» – $116\,666,7 \pm 31\,111,1$ кг/с, по параметру «рабочая поза» – $67,6 \pm 5,6$ %, по параметру «наклоны корпуса» – 125 ± 25 раз, по параметру «подъем и перемещение тяжести при чередовании с другой работой» – $32,5 \pm 2,5$ кг [9].

Характерно, что на 82% рабочих мест наблюдается сочетанное воздействие нескольких производственных факторов. Это приводит к возникновению синергетического эффекта и росту риска получения профессиональных заболеваний среди работников вследствие взаимного усиления негативного воздействия ВПФ [8, 10]. Здесь стоит отметить один из наиболее специфических недостатков термошахтной технологии, заключающийся в необходимости пребывания людей в среде с нагревающим микроклиматом, где температура воздуха может достигать 45°C , а влажность 85% [11, 12]. Это, с

одной стороны, значительно увеличивает нагрузку на сердечно-сосудистую и центральную нервную систему, приводит к снижению работоспособности, формирует опасность теплового удара или несчастного случая с более тяжелыми последствиями [13]. С другой стороны, нагревающий микроклимат в совокупности с повышенными уровнями шума и вибрации значительно повышают нагрузку на нервную, опорно-двигательную и терморегулирующую системы человека [14]. Известен также синергетический эффект между нагревающим микроклиматом и химическим фактором (на некоторых рабочих местах значения индекса, результирующего сочетанное влияние температуры воздуха, скорости его движения, влажности и теплового облучения на теплообмен человека с окружающей средой, соответствует подклассу условий труда 3.4 «вредные условия труда 4 степени», а концентрация компонентов нефти соответствует подклассу условий труда 3.2 «вредные условия труда 2 степени») [15].

Кроме того, производственная среда термошахт характеризуется синергетическим воздействием следующих ВПФ [8]:

- вибрации и производственного шума, вибрации и тяжести труда, вибрации и запыленности воздуха;
- виброакустических факторов и химического фактора, а также тяжести труда;
- производственного шума и тяжести труда, производственного шума и запыленности воздуха;
- тяжести труда и химического фактора, тяжести труда и запыленности воздуха.

Анализ профессиональной заболеваемости. Вредные условия труда закономерно приводят к развитию у работников профессиональных заболеваний. Так, ВПФ в сочетании со стрессорами производственной среды приводят к снижению функциональных

резервов организмов работников и возникновению патологических процессов [16]. Среди рабочих мест с наибольшей частотой возникновения профессиональных заболеваний следует отметить рабочие места персонала участка проходки и расширения горных выработок (в среднем 5,6 на 100 работников). В работе [17] отмечается, что на этих рабочих местах профессиональные патологии могут возникать уже при стаже работы 5 лет, а при стаже от 8 до 17 лет все работники попадают в зону повышенного риска.

Для термошахтной технологии добычи нефти характерны следующие профессиональные заболевания: хроническая сенсорная тугоухость, вибрационная болезнь верхних конечностей, хронические радикулопатии (пояснично-крестцовая, шейная), рефлексорный миотонический синдром [17]. Факторы опасности развития профессиональных заболеваний воздействуют на 77,4% горнорабочих, а 30% уже имеют первичные признаки профессионального заболевания [10].

Характерно, что виброакустические факторы являются причиной 59% профессиональных заболеваний у подземного персонала, что делает их наиболее значимыми среди всех ВПФ. В группе риска по возникновению профессиональной тугоухости находится персонал на участке проходки и добычи нефти. Средний стаж работы для подземного персонала без возникновения заболеваний органов слуха составляет в среднем 7,3 года. [10] Результатом воздействия локальной вибрации на подземный персонал являются сенсорные полинейропатии верхних конечностей, которые могут сопровождаться вегетативно-трофическими расстройствами и синдромами поражения костно-мышечной системы. Доля признаков воздействия вибрации на верхние конечности составляет около 82,9% [10].

Заболевания легких пылевой этиологии встречаются у 12,9% подземных рабочих, занятых проходкой и расширением горных выработок. Так, результаты исследования [10] демонстрируют, что у 24% горнорабочих наблюдаются легкие нарушения диффузионной способности легких.

Результатом паротеплового воздействия на нефтеносный массив является не только увеличение температуры воздуха в нефтешахте, но и интенсификация выделения легких компонентов нефтяных газов в рудничный воздух [18]. Это приводит к воздействию химического фактора на организм работников и образованию в их крови повышенных содержаний бензола, орто-, мета-, пара-ксилола, толуола, а также изменению морфофункциональных признаков дисфункции эндотелия и нарушению регуляции тонуса плечевой артерии [15]. Основными источниками данного тепловыделения являются породный массив, устьева арматура и истекающая жидкость [19, 20]. Наибольшие температуры (40-46°C) зафиксированы в блоках на этапе интенсивной добычи в период с 2,5 до 7 лет работы блока. Этот временной период жизненного цикла отработки

блока, когда тепловой фронт достигает горные выработки, сопровождается наибольшим спектром выделяемых нефтью фракций [20].

Нахождение в условиях повышенных температур и высокой влажности, которые характерны для ряда рабочих мест, приводит к нарушению функции терморегуляции организма: отвод тепла за счет конвекции снижается из-за незначительного перепада между температурой кожи и температурой окружающей среды; потери тепла за счет испарения пота также минимизируются из-за высокой относительной влажности. Это приводит к значительным нагрузкам на сердечно-сосудистую систему, высоким потерям электролитов в организме, повышению утомляемости и ухудшению концентрации внимания [21]. Вместе с тем наблюдается синергетический эффект при сочетании нагревающего микроклимата и вибрационно-шумового фактора: увеличение температуры воздуха на 1°C в действии на слуховой анализатор эквивалентно увеличению уровня шума на 0,7 дБ А [21].

В работах [16, 22] также установлено, что при сочетанном воздействии конвекционного тепла и компонентов нефти в воздухе при стаже 5 лет и более формируются функциональные сосудистые изменения, которые также трансформируются в артериальную гипертензию.

Сочетанное действие производственных и социальных факторов способствуют развитию хронического утомления уже при стаже 7 лет. В работе [23] отмечается, что в результате воздействия нейropsychологических и физических нагрузок у работников отмечается снижение адаптационных резервов организма, формирование вегетативных нарушений с развитием дисфункции сосудистого тонуса.

Среди основных коренных причин возникновения профзаболеваний у работников отмечаются [14]:

- несовершенство технологического процесса (40%);
- конструктивные недостатки оборудования (26%);
- нарушение технологического процесса (12%);
- неприменение средств индивидуальной защиты (СИЗ) (7%);
- недостатки в организации рабочих мест (8 %).

Анализ опасных производственных факторов, травматизма и аварийности. В случае с уникальной малоизученной с точки зрения безопасности технологии шахтной добычи нефти необходимо подходить к анализу и формированию мероприятий с учетом особенностей технологии [19, 24]. Результатом функционирования нефтешахт является воздействие на работников комплекса ОПФ: движущиеся машины и механизмы, повышенная температура воздуха и поверхностей оборудования, наличие электрооборудования под напряжением, наличие токсичных и раздражающих веществ, опасность

выброса пара, опасность пожара, взрыва и т.д.

На рисунке 1 представлена динамика производственного травматизма на предприятии «Яреганефть» в период с 2003 по 2020 гг. [24]. При этом на долю легких несчастных случаев приходится 38% инцидентов, на долю тяжелых несчастных случаев –

41%, на долю несчастных случаев со смертельным исходом – 21%. Согласно приведенным данным, начиная с 2013 г. происходит увеличение количества несчастных случаев, что может быть обусловлено тенденцией к росту интенсивности проходческих и добычных работ.

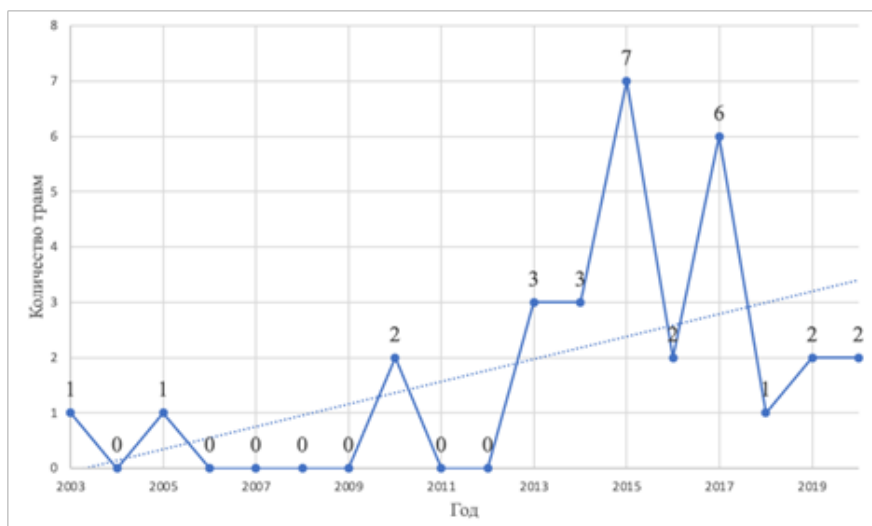


Рисунок 1 – Динамика несчастных случаев на предприятии «Яреганефть» в период 2003-2020 гг. (составлено авторами)

Указанный период характеризуется частым возникновением несчастных случаев, в том числе смертельных, вызванных обрушениями горных пород. Так, в 2014 г. в результате обвала 2 работника получили травмы разной степени тяжести, в 2015 г. при обрушении погиб 1 крепильщик. В 2017 г. произошли 2 аварии, вызванные обрушениями выработок: в июле 2017 в результате завала шурфа в НШ-3 2 горнорабочих получили травмы, в сентябре 2017 при проведении проходческих работ в забое НШ-1 произошло обрушение, в результате чего погиб 1 проходчик.

Как отмечалось ранее, реализация технологии термошахтной добычи нефти с использованием нагретого пара обуславливает наличие специфических для подземных работ ВПФ и ОПФ. Результатом этого является не только формирование неблагоприятного микроклимата на рабочих местах, но и опасность травмирования работников: так, в 2015 году в результате прорыва пара в выработки шахты НШ-2 погибли 2 горнорабочих.

В период 2019-2022 гг. происходили аварии по причине пожаров, в том числе приведшие к смертельным групповыми несчастным случая [25]:

- 2019 г. – пожар в уклонном блоке 1-3Д Север шахты НШ-1, погибли 2 работника;
- 2020 г. – пожар в уклонном блоке 3Т-4 шахты НШ-3, погибли 2 работника;
- 2020 г. – пожар в электровозном депо НШ-1;
- 2022 г. – пожар в уклонном блоке 2Т-4 НШ №3.

Стоит отметить, что в ходе ликвидации пожара, произошедшего 1 ноября 2020 г. в НШ №3, горноспасателями были обнаружены признаки

взрывов газовоздушных смесей в подземных выработках [26]. Это свидетельствует о возможности возникновения взрывоопасной среды в результате испарения компонентов высоковязкой нефти при ее нагревании и позволяет сделать вывод о том, что данная опасность характерна не только для шахтной добычи легких нефтей [1], но и для термошахтной добычи высоковязкой нефти. Вместе с тем для более детального анализа проблемы необходимо проведение исследований по определению вероятности возникновения взрывоопасной среды в рудничном воздухе как в штатных, так и в аварийных режимах функционирования нефтешахт.

Обсуждение. В ходе анализа условий труда на действующих в Российской Федерации нефтешахтах было выявлено, что среди персонала нефтешахт наиболее часто встречаются профессиональные заболевания, возникающие из-за действия ВПФ, характерных для подземной разработки месторождений: различные виброшумовые патологии, заболевания опорно-двигательного аппарата, заболевания легких пылевой этиологии. Вместе с тем работники нефтешахт находятся под воздействием повышенного риска травмирования в результате обрушений горных выработок, что также часто встречается в угледобывающей и горнорудной отраслях.

Вместе с тем, для термошахтной технологии добычи нефти также характерны такие специфические условия труда как нагревающий микроклимат с повышенными температурой и влажностью рудничного воздуха и наличие в его составе различных химических веществ, которые образуются

в результате дегазации нефти и способствуют негативным изменениям в организме человека. Важно отметить, что сочетание указанных специфических условий микроклимата и состава рудничного воздуха с вредностями, характерными для подземной разработки месторождений, приводит к образованию между ними синергетических эффектов, их взаимоусилению и росту профессиональных рисков возникновения у работников профессиональных заболеваний. Это, в целом, подтверждает уникальность условий труда нефтешахт, и, в частности, требует учета специфики термошахтной технологии, даже при внедрении таких защитных мероприятий, которые уже нашли широкое применение в других отраслях промышленности.

Одной из наиболее значимых опасностей, характерных для нефтяных шахт, являются подземные пожары, которые зачастую приводят к человеческим жертвам. Доля пожаров в структуре причин смертельного травматизма на нефтешахтах в разы превышает аналогичный показатель на угольных шахтах, что также говорит о необходимости разработки таких средств защиты, которые были бы направлены на подавление причин возникновения пожаров, характерных именно для нефтяных шахт. Стоит отдельно отметить опасность возникновения взрывов газовоздушных смесей, формирующихся в результате испарения компонентов высоковязкой нефти в рудничный воздух. Данная опасность является менее изученной по сравнению с другими идентифицированными ВПФ и ОПФ, что делает актуальным проведение исследований возможности формирования взрывоопасных сред как в штатных, так и в аварийных режимах работы.

Выводы. Таким образом, проанализированные материалы СОУТ, а также результаты анализа статистических данных по профессиональной заболеваемости, полученные в процессе проведения медицинских осмотров, позволили выявить наиболее опасные при термошахтной добычи нефти ВОПФ – вибрацию, шумовое воздействие и факторы микроклимата. Стоит отметить, что учитывая недостаточную изученность проблемы, а также высокий уровень потенциальных рисков, одной из ключевых опасностей для жизни и здоровья персонала нефтяных шахт является возможность возникновения взрывов парогазовоздушных смесей, в том числе образующихся в условиях возникновения подземных пожаров.

В соответствии с передовым опытом в качестве возможного решения проблемы повышения безопасности труда на нефтешахтах целесообразно создание системы управления профессиональными рисками, основанной на их заблаговременной оценке и всестороннем анализе, что требует создания соответствующего методического обеспечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Коноплев Ю.П. Нефтяная шахта – технология, позволяющая обеспечить половину добычи нефти в XXI в.

на открытых и отработанных месторождениях России / Ю.П. Коноплев, А.Г. Демченко, А.А. Демченко // Недропользование XXI век. – 2020. – № 1(83). – С. 46-55.

2. Кислицын М.С., Ярошенко В.В. Перспектива развития нефтешахт Ярегского месторождения // ГИАБ. 2018. – №1.

3. Фомин А.И. Улучшение температурного режима на рабочих местах в условиях термошахтной добычи высоковязкой нефти Ярегского месторождения / А.И. Фомин, Л.А. Шевченко, Т.В. Грунковой // Безопасность жизнедеятельности. – 2021. – № 7(247). – С. 12-17.

4. Коноплев Ю.П., Питиримов В.В., Табаков В.П., Тюнькин Б.А. Термошахтная разработка месторождений с тяжелыми нефтями и природными битумами (на примере Ярегского нефтяного месторождения) // ГИАБ. – 2005. – №3.

5. Кухаренко Е.И. Технологии интенсификации добычи высоковязкой нефти / Е.И. Кухаренко // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XXIII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных, посвященного 120-летию со дня рождения академика К.И. Сагпаева, 120-летию со дня рождения профессора К.В. Радугина, Томск, 08-12 апреля 2019 года. Том 2. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2019. – С. 135-136.

6. Фомин А.И. Особенности разработки Ярегского месторождения тяжелой нефти // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. – 2019. – № 1. – С. 75-81.

7. Воробьев А.Е., Джимиева Р.Б. Инновационные технологии разработки месторождений горючего сланца и высоковязкой нефти шахтным способом // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. – 2009. – №3.

8. Фомин А.И. Организация ретроспективного исследования состояния здоровья работников нефтешахт Ярегского месторождения / А.И. Фомин, Т. В. Грунковой // Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах: Сборник материалов XIV Международной научно-практической конференции Кемерово, 23-25 ноября 2021 года. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2021. – С. 508-1-508-5.

9. Фомин А.И. Учет синергетических эффектов при оценке профессионального риска в нефтяных шахтах / А.И. Фомин, Е.В. Нор, Т.В. Грунковой // Безопасность труда в промышленности. – 2021. – № 9. – С. 89-94. – DOI 10.24000/0409-2961-2021-9-89-94.

10. Грунковой Т.В. Гигиеническая оценка риска развития профзаболеваний у работников, занятых термошахтной добычей нефти / Т.В. Грунковой, А.Г. Бердник, М.М. Бердник // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2018. – Т. 18, № 1. – С. 85-100. – DOI 10.15593/2224-9923/2018.3.8.

11. Степанов И.С. Метод оценки профессионального риска в условиях нагревающего микроклимата при ведении подземных горных работ [Текст] / И.С. Степанов // Совершенствование технологии горных работ и подготовка кадров для обеспечения техносферной безопасности в условиях Северо-Востока России: сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, (г. Якутск, 25 апр. 2018 г.). – Якутск, 2018. – С. 39-44.

12. Нор М.А., Нор Е.В., Цхадая Н.Д. (2017). Источники нагревающего микроклимата при разработке месторождений высоковязких нефтей термошахтным способом. Записки Горного института, 225, 360. <https://doi.org/10.18454/zpi.2017.3.360>

13. Клюкин Ю.А., Семин М.А., Зайцев А.В. Экспериментальное исследование микроклиматических условий и факторов их формирования в нефтяной шахте // Вестник ПНИПУ: Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2018. – Т. 18. – № 1. – С. 63-75.

14. Ал-Мохаммед А.С. Нормализация температурного режима при добыче нефти шахтным способом в условиях нефтешахты 1 ППО НШПП "Яреганефть" ООО "ЛУКОЙЛ-Коми" / А.С. Ал-Мохаммед // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. – 2021. – Т. 1. – С. 100-104.

15. Вознесенский Н.К., Белицкая В.Э., Май И.В., Уланова

Т.С. Функциональное состояние эндотелия у операторов продуквки скважин при термошахтной добыче нефти. Медицина труда и промышленная экология. 2017;(11):19-24.

16. Воробьева А.А. Вегетативная дисфункция как предиктор артериальной гипертензии у работающих во вредных условиях труда / А.А. Воробьева, Е.М. Власова, О.Ю. Устинова, В.А. Фокин // Анализ риска здоровью – 2022. Фундаментальные и прикладные аспекты обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения: Материалы международной встречи по окружающей среде и здоровью RISE-2022. Материалы XII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. В двух томах, Пермь, 18-20 мая 2022 года. Том 2. – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2022. – С. 17-27.

17. Фомин А.И. Условия труда и функция внешнего дыхания у подземных работников нефтяной шахты / А.И. Фомин, А.Е. Жуйков, Т.В. Грунковой // Гигиена и санитария. – 2022. – Т. 101, № 4. – С. 406-411. – DOI 10.47470/0016-9900-2022-101-4-406-411.

18. Цхадая Н.Д. Критерий оценки оптимальных условий труда в горных выработках нефтяных шахт / Н.Д. Цхадая, А.Е. Жуйков, З.Х. Ягубов // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2012. – № 5. – С. 318-325.

19. Рудаков М.Л., Степанов И.С. (2017). Оценка профессионального риска при воздействии нагревающего микроклимата при ведении подземных горных работ. Записки Горного института, 225, 364. <https://doi.org/10.18454/zpmi.2017.3.364>.

20. Гендлер С.Г., Фазылов И.Р., Абашин А.Н. Результаты экспериментальных исследований теплового режима нефтяных шахт при термическом способе добычи нефти // ГИАБ. – 2022. – №6-1.

21. Цхадая Н.Д. Перспективы использования телеметрической системы для нормализации микроклимата в нефтяной шахте / Н.Д. Цхадая, А.Е. Жуйков, З.Х. Ягубов, Э.З. Ягубов // Нефтегазовое дело. – 2014. – Т. 12, № 2. – С. 173-177.

22. Власова Е.М. Анализ функционального состояния работников, занятых на добыче нефтитермошахтным способом / Е.М. Власова, О.Ю. Устинова, А.Е. Носов // Профилактическая и клиническая медицина. – 2019. – № 2(71). – С. 21-26.

23. Устинова О.Ю., Костарев В.Г., Алексеев В.Б., Власова Е.М., Носов А.Е., Зайцев А.В., Левин Л.Ю. Влияние условий труда на функциональное состояние организма работников, занятых на добыче нефти термошахтным способом. Гигиена и санитария. 2020;99(11):1222-1229. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2020-99-11-1222-1229>.

24. Глебова Е.В., Волохина А.Т., Вихров А.Е. (2023). Оценка эффективности управления культурой производственной безопасности в компаниях ТЭК. Записки Горного института, 259, 68-78. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.12>.

25. «Анализ причин и обстоятельств несчастных случаев в НШПП «Яреганефть»

26. Седнев Д. (2021). Реконструкция нефтяных шахт № 1, 2 и 3. Взаимосвязь смертельных случаев на производстве и качества выполнения проектной документации. Анализ ошибок. Горное эхо, (1), 139-142. <https://doi.org/10.7242/echo.2021.1.25>.

27. Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий: [Электронный ресурс] URL: <https://mchs.gov.ru> (дата обращения 20.08.2023).

Статья поступила в редакцию 17.10.2023

Статья принята к публикации 15.12.2023

УДК 331.45

EDN: DJONTF

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА МОНИТОРИНГА БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА
НА ПРЕДПРИЯТИЯХ СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ С ПРИМЕНЕНИЕМ
ТЕХНОЛОГИИ ИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

© Авторы 2023

SPIN: 9499-2266

AuthorID: 300968

ORCID: 0000-0002-6759-7863

ResearcherID: AFA-6966-2022

ГОРБУНОВА Ольга Владимировна, доцент, кандидат биологических наук,
доцент кафедры «Техносферная безопасность»*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет
(190005, Россия, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, e-mail: yolga73@mail.ru)*

SPIN: 4944-2360

AuthorID: 1035858

ORCID: 0000-0001-6840-6865

НАМ Галина Евгеньевна, старший преподаватель кафедры «Техносферная безопасность»*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет
(190005, Россия, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, e-mail: yamibum@gmail.com)*

ORCID: 0000-0001-9032-5084

ПАДЕРНО Павел Иосифович, профессор, доктор технических наук, заслуженный деятель науки РФ,
лауреат премии Правительства РФ в области образования, профессор кафедры «Информационных систем»*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)**(197022, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5, e-mail: pipaderno@list.ru)*

Аннотация. Проведен обзор современного состояния различных подходов и систем мониторинга безопасности труда на строительных площадках нашей страны. Действующие нормативно-правовые акты в области охраны труда работников в Российской Федерации предусматривают ответственность работодателя по обеспечению безопасности на рабочих местах, в рамках требований по организации системы управления охраной труда и промышленной безопасности (СУОТ и ПБ). Одним из важнейших элементов управления безопасностью труда на рабочих местах предприятия является осуществление контрольно-надзорных мероприятий и мониторинг текущего состояния безопасности. Своевременность получения информации в процессе мониторинга за безопасностью труда имеет ключевое значение для предупреждения травматизма работников и аварий. Для реализации такого подхода становится актуальна разработка единой информационной среды, как основы для создания сопровождения и совместного использования структурированной информации о текущем состоянии безопасности на объекте строительства и его участниках с использованием технологий информационного моделирования (далее – ТИМ) и цифрового двойника (далее – ЦД). Предложена математическая модель процесса для осуществления мониторинга за уровнем безопасности труда на строительной площадке с целью её дальнейшего применения в создании системы информационной поддержки управления безопасностью труда на объектах строительной отрасли для осуществления контроля и принятия превентивных мер по предупреждению травматизма. Математическая модель послужит для интерпретации в машинный язык будущего программного отечественного продукта, как инструмента повышения устойчивости предприятия на основе ТИМ, обеспечивающего прогнозирование, предотвращение и парирование «повреждений», ситуаций с целью снижения несчастных случаев, выдачи оперативных рекомендаций по устранению аварий и оперативному возобновлению строительных операций с целью снижения простоев.

Ключевые слова: математическая модель, системы мониторинга безопасности труда, технологии информационного моделирования.

**MATHEMATICAL MODEL OF THE OCCUPATIONAL SAFETY MONITORING PROCESS
IN CONSTRUCTION INDUSTRY USING INFORMATION MODELING TECHNOLOGY**

© The Authors 2023

GORBUNOVA Olga Vladimirovna, assistant professor, candidate of biological sciences,
assistant professor of the department «Technosphere Safety»*Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering
(190005, Russia, Saint Petersburg, Vtoraya Krasnoarmeiskaya street 4, e-mail: yolga73@mail.ru)***NAM Galina Evgenievna**, senior teacher of the department «Technosphere Safety»*Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering
(190005, Russia, Saint Petersburg, Vtoraya Krasnoarmeiskaya street 4, e-mail: yamibum@gmail.com)*

PADERNO Pavel Iosifovich, professor, doctor of technical sciences,
honored scientist of the Russian Federation, laureate of the Russian Government Award in Education,
professor of the department «Information Systems»

St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI" named after V.I. Ulyanov (Lenin)
(197022, Russia, Saint Petersburg, Professor Popov street 5, e-mail: pipaderno@list.ru)

Abstract. A review of the current condition of various approaches and occupational safety monitoring systems in construction sites in our country was conducted. Legal acts of occupational safety in Russian Federation provide for the responsibility of the employer to ensure safety in the workplace, as part of the requirements for organizing a labor and industrial safety management system. One of the most important elements of occupational safety management at workplaces is the implementation of control and supervisory measures and monitoring of the current condition of safety. The timeliness of obtaining information in the process of monitoring occupational safety is the key to preventing injuries and accidents. To implement the approach, it becomes relevant to develop a unified information environment as the basis for creating support and sharing structured information about the current state of safety at the construction site and its participants using information modeling (BIM) and digital twin technologies (DT). The mathematical model of the process for monitoring the level of occupational safety on a construction site is proposed for using to create an information support system for managing occupational safety in construction industry to monitor and take preventive measures to prevent injuries. The mathematical model will serve to interpret into machine language a future national software product as a tool for increasing the sustainability of an enterprise based on BIM, providing prognostication, prevention and counteracting of “damage” situations in order to reduce accidents, issue operational recommendations for liquidation accidents and promptly resuming construction operations to reduce downtime.

Keywords: mathematical model, occupational safety monitoring systems, information modeling technologies.

Для цитирования: Горбунова О.В. Математическая модель процесса мониторинга безопасности труда на предприятиях строительной отрасли с применением технологии информационного моделирования / О.В. Горбунова, Г.Е. Нам, П.И. Падерно // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 12. – № 4(64). – С. 229-238. – EDN: DJNTF.

Введение. Повсеместная цифровая трансформация секторов экономики в Российской Федерации, в том числе в строительной отрасли, требует четкого понимания механизмов и алгоритмов, происходящих бизнес и производственных процессов. Рассматриваются механизмы, действующие в строительной отрасли, по мониторингу условий и охраны труда на предприятиях, так же приведены данные о разработанной математической модели.

Методология. Целью статьи является построение модели процесса мониторинга за уровнем безопасности труда направленной на дальнейшее создание системы информационной поддержки управления безопасностью на объектах строительной отрасли для осуществления контроля и принятия превентивных мер по предупреждению травматизма на строительных площадках.

Рассматривая структуру системы управления охраной труда на предприятиях и в организациях, действующую на основе российского законодательства, можно с большей долей уверенности сказать, что такая структура управления в большинстве случаев единообразна. Конечно же, в каждой отрасли экономики имеется своя специфика и свойственные ей особенности, зависящие от своеобразия производственных процессов и бизнес-процессов, однако многие работодатели руководствуются принципом «наименьшего сопротивления» и создают структуру управления, в том числе в области безопасности труда, по проверенному «веками» варианту. Не является исключением и строительная отрасль, где производственные процессы более

или менее аналогичны, и опасности и риски так же имеют сходный характер [1].

Рассмотрим действующие механизмы осуществления мониторинга и управления охраной труда в строительстве, на примере строительных компаний. Чаще всего, организация системы мониторинга условий и состояния охраны труда основывается, согласно требованиям действующих нормативных правовых актов в РФ, на проведении проверок, наблюдений, аудитов и других мероприятий, носящих периодический характер [2]. Не так давно, в отрасли отошли от календарно-плановых проверок, так как они были мало информативны и неэффективны в силу того, что проверяемые были заранее подготовлены к проверкам. Однако, следует отметить, что документарно, так или иначе, периодичность в локальных нормативных актах должна быть указана.

В каждой строительной компании согласно Приказа №776н [3] и Приказа № 37 [4] должно быть разработано положение о СУОТ, в котором показана действующая структура управления охраной труда, приведены особенности взаимодействия уровней в системе управления безопасностью труда, указаны периодичность мероприятий по охране труда (далее – ОТ).

В свою очередь, согласно Приказа №771н [5] в организации должны разрабатывать календарный план-график мероприятий, направленных на улучшение условий и охраны труда, ликвидацию или снижение уровней профессиональных рисков либо недопущение повышения их уровней, который будет предметом проверок со стороны Роструда [6].

Следует обратить внимание на тот факт, что строительная отрасль, по сей день, остается в числе одной из наиболее травмоопасных отраслей экономики в Российской Федерации. Даже при переходе на риск-ориентированный подход в системе управления ОТ на объектах строительства ситуация с травматизмом остается на том же уровне.

По данным Роструда за период с 2017 по 2021 год производственный травматизм со смертельным исходом находился в 2017 году на уровне около 1700 случаев в год и только лишь в 2020 году было отмечено незначительное снижение показателя до 1476 случаев в год. Следует отметить, что по количеству скрытых правонарушений, связанных с несчастными случаями на производстве, наблюдается устойчивая тенденция по снижению, так с почти 700 случаев, зафиксированных в 2017 году до около 470 случаев к 2021 году. Та же тенденция наблюдается и по снижению групповых несчастных случаев на производстве [7]. В связи с наблюдающимися трендами к снижению производственного травматизма работодателями и Рострудом отмечается важность проведения мероприятий направленных на своевременное выявление опасностей и оценке рисков на рабочих местах, и эта процедура основывается на своевременном проведении осмотров и аудитов, которые обеспечивают мониторинг ситуации по безопасности труда.

Варьирование проведения проверок, обходов, аудитов строительной площадки может носить различный характер – плановый, внеплановый. Способы фиксации результатов проведения проверок,

аудита, мониторинга могут быть так же различными, например, с фиксацией в так называемых чек-листах, или других формах шаблонов, как на бумажном, так и электронном носителях, с применением различных приложений программного обеспечения, используемого в организации. Все виды нарушений и несоответствий в области безопасности труда фиксируются по факту их обнаружения в указанных выше документах, на основании которых, в зависимости от степени риска, должны быть приняты меры по устранению (недопущению) реализации риска, который может повлиять на жизнь и здоровье работников.

Так, например, в качестве формы контроля за состоянием условий и охраны труда в строительной компании *Seil City* в городе Санкт-Петербурге, применяется форма шаблона, так называемая «Шахматка», которая изначально применялась как один из самых популярных, удобных инструментов в строительной и риэлтерской индустрии. Шахматка представляет из себя «квадратики» помещений на плане дома и помогает наглядно получить всю интересующую информацию: наличие свободных квартир с учетом секций и этажей, характеристики, стоимость, планировку и другие характеристики. Эта удобная форма была адаптирована для нужд системы управления охраной труда и в ней отражается вся информация о нарушениях и несоответствиях по объектам контроля, либо о хорошем состоянии, в виде цветовой и наглядной информации – фотофиксации событий и других отметок, и информации, пример чек-листа показан на рисунке 1.

13-я очередь строительства ВЫСОТА
Отчет от 12.12.2022

Периметр этажа

КОРПУС 1										КОРПУС 2								
сек 1	сек 2	сек 3	сек 4	сек 5	сек 6	сек 7	сек 8	сек 9	сек 10	сек 1	сек 2	сек 3	сек 4	сек 5	сек 6	сек 7	сек 8	сек 9
25										25								
24										24					ОКН	ОКОНЦ		
23										23					МОН	МОНОЛИТ		
22										22					КМ	КАМЕНЦ		
21										21					ФАСАД	ФАСАД		
20										20								
19										19								
18										18								
17										17								
16										16								
15										15								
14										14								
13										13								
12										12								
11										11								
10										10								
9										9								
8										8								
7										7								
6										6								
5										5								
4										4								
3										3								
2										2								
1										1								
0										0								

По горизонтали – секции
По вертикали – этажи

■ - Выявлены нарушения
■ - Нарушений нет

Рисунок 1 – Примерный вид чек-листа по охране труда – «Шахматка»

Рассмотрим еще один подход, основанный на косвенном методе количественной оценки производственных рисков – система Элмери. Систему Элмери разработали Институт профессионального здравоохранения Финляндии и Управление по охра-

не труда при Министерстве социального обеспечения и здравоохранения Финляндии [8]. Данная система применялась под названием «TR-барометр», оформленного в виде чек-листа, в строительной компании «ЮИТ» (YIT) для оценки уровня безо-

пасности на рабочих местах.

С помощью использования формы чек-листа проводили оценку уровня безопасности рабочих мест по семи группам факторов: производственный процесс; порядок и чистота на рабочем месте; безопасность машин и оборудования; факторы окружающей среды; эргономика; проходы и проезды; возможность для спасения и оказания первой помощи.

Оценка производится на выбранном рабочем месте, и результаты заносятся в чек-лист по принципу «хорошо» или «плохо» («+» или «-», «соответствует» или «не соответствует»). Итоговая оценка - состояние объекта наблюдения признается "хорошим" и ставится «+» в графу, если он отвечает минимально необходимому уровню, по мнению наблюдателя, требований безопасности. Если состояние объекта не соответствует требованиям охраны труда, то ставится отметка «-».

Уровень охраны труда на объекте наблюдения (рабочем месте, структурном подразделении, организации в целом) оценивается в процентах, и позволяет обобщенно судить о степени соответствия объекта наблюдения требованиям охраны труда. Индекс Элмери рассчитывается по следующему соотношению:

$$\text{Индекс Элмери} = \frac{\text{пункты хорошо}}{\text{пункты хорошо} + \text{пункты плохо}} \times 100 \%$$

Данный метод не в полной мере отражает реальную картину уровня безопасности на рабочих местах.

Более современные подходы в системе монито-

ринга состояния безопасности труда, на сегодняшний день, транслируют некоторые крупные строительные организации, внедрившие в СУОТ цифровые технологии. Это связано, в первую очередь, с произошедшими изменениями законодательства РФ [9] регламентирующего переход на более современные цифровые системы управления процессами строительства [10, 11]. В городе Санкт-Петербурге имеется несколько таких крупных строительных компаний, которые внедрили цифровые решения в свой производственный цикл.

Рассмотрим пример, достаточно продвинувшейся в области цифровизации охраны труда строительной организации – Корпорации «Эталон», которая одной из первых в нашей стране внедрила технологии информационного моделирования в систему контроля за строительным производством. Подразделением компании был разработан и апробирован программный продукт для внесения различных данных об объекте строительства в программу *Navisworks*, способствующий проведению анализа и оценки уровня безопасности труда на строительных площадках компании [12].

Цифровая среда, разработанная «Эталоном» предназначена как для линейных руководителей строительных площадок, так и для всех других инженерно-технических работников, различных уровней контроля за безопасностью труда в Компании, схема примерной структуры СУОТ приведена на рисунке 2.

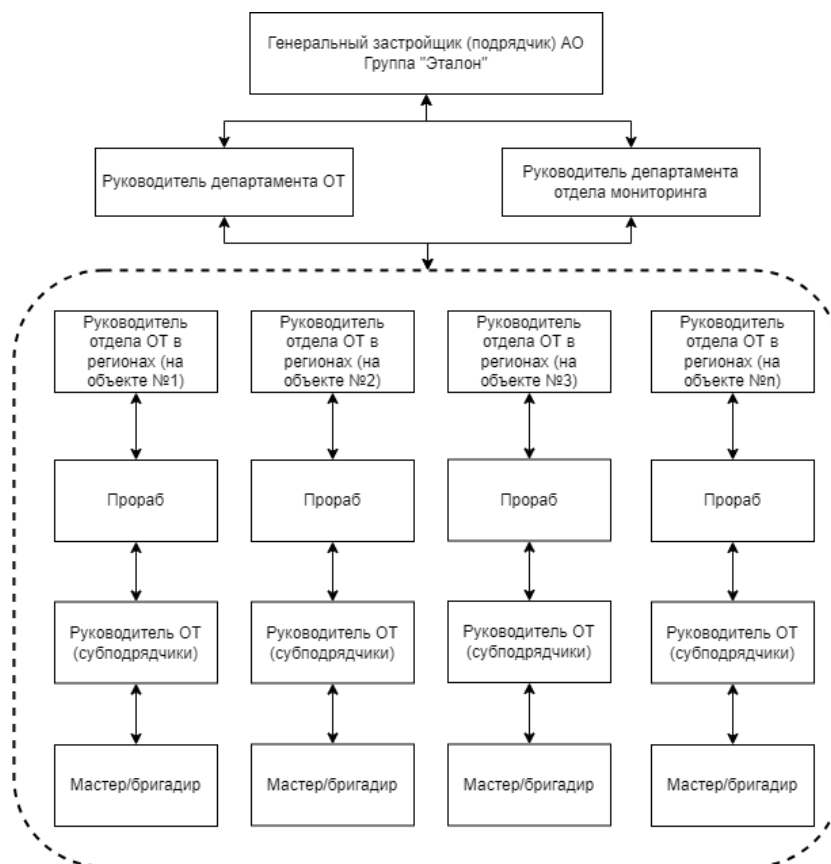


Рисунок 2 – Схема примерной структуры системы управления охраной труда

Полагается, что оперативную информацию на момент производства работ на строительной площадке может получать линейный руководитель, ответственный за состояние условий и ОТ – мастер или бригадир. Исходя из количества контролируемых участков, которые могут быть разнесены на достаточно большое расстояние друг от друга, можно сделать вывод о возможном запаздывании и снижении актуальности, и ценности получения оперативной информации о состоянии уровня безопасности на рабочих местах своих подчиненных.

Однако, цифровые решения, применяемые на строительных площадках «Эталона», помогли улучшить ситуацию по отслеживанию состояния безопасности труда. Инженерно-технические работники, с помощью планшетов на которые установлено ПО, проводят обход и осмотр территории строительной площадки, делают фотофиксацию и вносят отметки в соответствующие графы электронного помощника, который позволяет увидеть точки контроля в 3D-модели строящегося объекта, с соответствующей цветовой маркировкой, обозначающей соответствующий уровень безопасности труда на рабочих местах. Данный метод опосредованно, с некоторой долей приближения, позволяет определить уровень безопасности труда на рабочих местах, так как периодичность проведения проверок составляет 1 раз в 12 дней по плану, а внеплановые проверки могут проходить эпизодически по факту зафиксированных нарушений.

В качестве ключевых показателей, по которым должен осуществляться сбор информации, определены семь критериев: предохранение от падения работников с высоты и перепадов по высоте, а также от падения предметов с высоты; процессы выполнения работ; порядок и организация на рабочих местах, уборка мусора и недопущение захламления; машины, применяемые на строительной площадке, приспособления и инструменты; леса, мостики, стремянки; электричество и освещение; средства пожаротушения.

В каждом из вышеупомянутых критериев предусмотрены подкритерии, определяющие данный показатель, всего их определено двадцать два. Выбор именно этих подкритериев был основан на требованиях нормативно-правовых документов, регламентирующих вопросы специальной оценки условий труда, риск-ориентированного подхода, а также классификации видов строительно-монтажных работ, на основе МДС 12-28.2006.

Определение уровня безопасности, основывается на унифицированной методике Элмери, и как в контрольных точках, так и на объекте в целом, определяется показателем – «индексом безопасности», который показывает в каком интервале состояния, из существующего диапазона, находится контрольный объект, а также степень риска – показывающей сумму риска по объекту. Граничные величины «уровня безопасности» соответствуют следующим

диапазнам:

1 уровень – неприемлемый, индекс безопасности находится в диапазоне от 0 до 55%;

2 уровень – низкий индекс безопасности в диапазоне от 55-75%;

3 уровень – начинается от 75% – минимальный целевой до 85%;

4 уровень – средний, соответствует 85%;

5 уровень – максимально достигнутый, соответствует 95%.

Так, в контрольных точках, охарактеризованных низким уровнем индекса безопасности – менее 75% частота проверок может быть увеличена и происходить ежедневно, до устранения несоответствий. В контрольных точках, где уровень индекса безопасности составляет высокую величину, например более 85% проверки могут проходить один раз в месяц [13].

Резюмируя вышеперечисленные подходы по осуществлению контроля в СУОТ следует отметить, что ощутимыми недостатками применения вышеуказанных способов проведения мониторинга состояния безопасности труда на строительной площадке является тот факт, что выявленные нарушения их количество и информация о них составлены на момент проверки для определенного проверяемого участка и имеют конкретную пространственно-временную характеристику, которая после проведения проверки может динамично изменяться, что обуславливает малую объективность полученной информации о состоянии безопасности труда на рабочих местах.

Результаты. Следующим этапом цифровой трансформации системы мониторинга и контроля в области охраны труда, представляется переход на превентивную систему мониторинга, основанную на применении систем информационной поддержки управления безопасностью с применением ТИМ в виде цифрового двойника [14, 15].

Построение формальных моделей. Построим формальную модель для описания процесса мониторинга состояния уровня безопасности труда, основанную на следующих положениях: – все состояния строительной площадки, с точки зрения безопасности труда являются дискретными, а производственные процессы обуславливают переходы между этими состояниями с некоторыми интенсивностями.

Граф состояний и возможных интенсивностей переходов приведен на рисунке 3. Обоснование выбора критериев контроля – K_{i-n} за состоянием безопасности на строительной площадке рассматривался в статье Г.Е. Нам, О.В. Горбунова // XXI век: Итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 12. – № 1(61). – С. 90-97.

На рисунке 3 показано:

1 состояние – идеальное, негативные факторы – отсутствуют, условия обеспечения безопасности труда соблюдены, контролируемые показатели –

K_{i-n} производственной среды находятся в пределах, установленных в нормативных правовых актах допустимых величин, системой информационной поддержки управления безопасностью осуществляется мониторинг в «штатном» режиме работы.

2 состояние – допустимое, негативные факторы – присутствуют, но находятся в пределах нормативных значений, осуществляется контроль параметров K_{i-n} производственных процессов с фиксацией времени пребывания в данном состоянии;

3 состояние – переходное, негативные факторы – присутствуют и переходят границу допустимых значений, незначительно превышая установленные пределы, на заданный интервал отклонений. Система информационной поддержки управления фиксирует время и/или скорость начала изменений

контролируемых параметров из переходного – 3 в предаварийное – 4 состояние, сообщая информацию об угрозе ЧП через систему оповещения (индивидуальные гаджеты);

4 состояние – предаварийное, негативные факторы – значительно превышают пределы допустимых величин на установленную заданную величину отклонения. Система информационной поддержки управления подает сигнал об угрозе жизни и здоровью работника, и выдает рекомендации, например –осуществить остановку процесса выполнения работ.

5 состояние – «отказ» (авария или ЧП) системы [16]. Система информационной поддержки управления сигнализирует в спасательные службы о происшествии и подает всеобщий сигнал «тревоги», через системы оповещения.

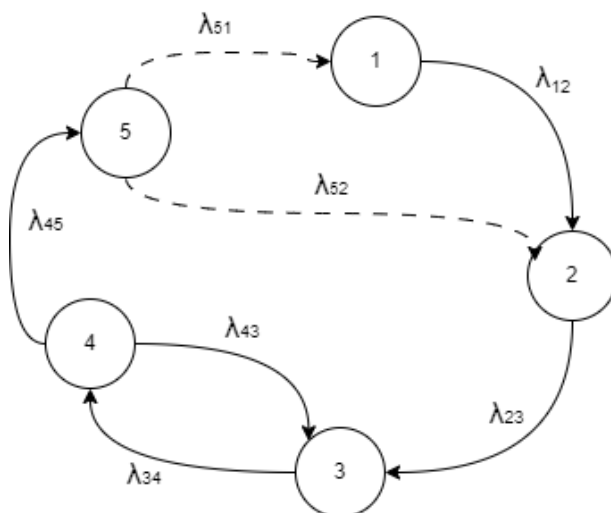


Рисунок 3 – Граф перехода между состояниями объекта (различными уровнями безопасности)

Процесс переходов из одного состояния в другое является марковским [17]. Получение вероятностных характеристик для такого процесса связано с решением системы дифференциальных уравнений [18], что достаточно несложно только для стационарного случая. В рассматриваемом случае речь идет о контроле и управлении процессом, в частности об оценке среднего времени до попадания в состояние 5 (авария, устранение последствий, восстановление и др.), которая в рамках данной математической модели будет считаться поглощающим. В этом конкретном случае более разумно использовать аппарат полумарковских процессов [19, 20].

Исходя из переходов между состояниями, представленных на рисунке 3 можно построить вложенную матрицу переходов для полумарковского процесса $P=(p_{ij})$, $i,j=1, 2,...,5$, где p_{ij} – вероятность прямого перехода системы из состояния i в состояние j , а также матрицу условных времен пребывания системы в состояниях $M=(m_{ij})$, $i,j=1, 2,...,5$, где m_{ij} – среднее время пребывания системы в состоянии i при условии последующего прямого перехода системы в состояние j . Следует заметить, что значения интенсивностей переходов в выраже-

ниях (1)-(10) и на рисунках 3, 4 определяются на основании статистических данных из соотношений $\lambda_{ij}=1/m_{ij}$, где m_{ij} – условное среднее время пребывания системы в состоянии i при условии перехода в состояние j .

$$P = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\lambda_{43}}{\lambda_{43} + \lambda_{45}} & 0 & \frac{\lambda_{45}}{\lambda_{43} + \lambda_{45}} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$M = \begin{pmatrix} 0 & 1/\lambda_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/\lambda_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/\lambda_{34} & 0 \\ 0 & 0 & 1/\lambda_{43} & 0 & 1/\lambda_{45} \\ 1/\lambda_{51} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Используя формулу $t_i = \sum_{j=1}^5 p_{ij} \cdot m_{ij}, i=1,2,...,5$ [19, 20] можем получить вектор значений средних времен пребывания в каждом из состояний:

$$t_1 = 1/\lambda_{12}, t_2 = 1/\lambda_{23}, t_3 = 1/\lambda_{34}, t_4 = 2/(\lambda_{43} + \lambda_{45}) \quad (2)$$

Ввиду того, что для планирования управлением безопасностью целесообразно ориентироваться на

значение среднего времени до наступления аварийного состояния (в целях возможного опережающего управления) введем в рассмотрение вектор средних времен до попадания системы в состояние 5 (до аварии) при условии, что в настоящий момент времени система находится в состоянии i ($i=1,2,3,4$) Тогда, для нашего случая, в соответствии с [19, 20], и с учетом соотношений (1) и (2) можно записать следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} T_1 = t_1 + T_2 = \frac{1}{\lambda_{12}} + T_2 \\ T_2 = t_2 + T_3 = \frac{1}{\lambda_{23}} + T_3 \\ T_3 = t_3 + T_4 = \frac{1}{\lambda_{34}} + T_4 \\ T_4 = t_4 + p_{43} \cdot T_3 = \frac{2}{\lambda_{43} + \lambda_{45}} + \frac{\lambda_{43}}{\lambda_{43} + \lambda_{45}} T_3 \end{cases} \quad (3)$$

Решая систему уравнений (3), получаем:

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{1}{\lambda_{12}} + \frac{1}{\lambda_{23}} + \left(1 + \frac{\lambda_{43}}{\lambda_{45}}\right) \frac{1}{\lambda_{34}} + \frac{1}{\lambda_{45}} \left(2 + \frac{\lambda_{43}}{\lambda_{34}}\right) \\ T_2 &= \frac{1}{\lambda_{23}} + \left(1 + \frac{\lambda_{43}}{\lambda_{45}}\right) \frac{1}{\lambda_{34}} + \frac{1}{\lambda_{45}} \left(2 + \frac{\lambda_{43}}{\lambda_{34}}\right) \\ T_3 &= \left(1 + \frac{\lambda_{43}}{\lambda_{45}}\right) \frac{1}{\lambda_{34}} + \frac{1}{\lambda_{45}} \left(2 + \frac{\lambda_{43}}{\lambda_{34}}\right) \\ T_4 &= \frac{1}{\lambda_{45}} \left(2 + \frac{\lambda_{43}}{\lambda_{34}}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

Замечание 1. Из формул (4) достаточно очевидно, что существенное влияние на время до аварии имеет отношение $\lambda_{43} / \lambda_{45}$, которое в значительной степени зависит от времени (интенсивности) формирования управляющих воздействий по опережающему управлению уровнем безопасности

объекта.

Рассмотрим случай, когда в состоянии 3 можно реализовывать комплекс превентивных мероприятий по улучшению условий труда. Тогда рисунок 3 приобретает следующий вид (рис. 4).

Замечание 2. Отсутствие значения интенсивности λ_{52} в матрицах (5) и выражениях (6)-(10) связано с тем, что, в рассматриваемом случае, после аварии и комплекса восстановительных мероприятий процесс полностью восстанавливается, т.е. переходит только в состояние 1.

По аналогии с предыдущим случаем исходя из переходов между состояниями, представленными на рисунке 4, можно также построить новые матрицы: – вложенную матрицу переходов для полумарковского процесса $P=(p_{ij})$, $i,j=1, 2, \dots, 5$, где p_{ij} – вероятность прямого перехода системы из состояния i в состояние j , и матрицу условных времен пребывания системы в состояниях $M=(m_{ij})$, $i,j=1, 2, \dots, 5$, где m_{ij} – среднее время пребывания системы в состоянии i при условии последующего прямого перехода системы в состояние j .

$$P = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\lambda_{32}}{\lambda_{32} + \lambda_{34}} & 0 & \frac{\lambda_{34}}{\lambda_{32} + \lambda_{34}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\lambda_{43}}{\lambda_{43} + \lambda_{45}} & 0 & \frac{\lambda_{45}}{\lambda_{43} + \lambda_{45}} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$M = \begin{pmatrix} 0 & 1/\lambda_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/\lambda_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 1/\lambda_{32} & 0 & 1/\lambda_{34} & 0 \\ 0 & 0 & 1/\lambda_{43} & 0 & 1/\lambda_{45} \\ 1/\lambda_{51} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

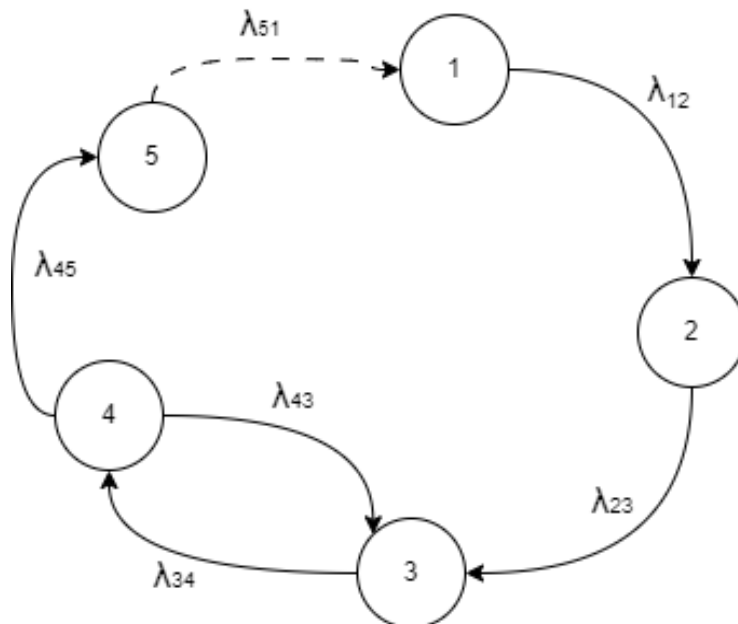


Рисунок 4 – Модифицированный граф перехода между состояниями объекта (различными уровнями безопасности)

Вторично используя формулу $t_i = \sum_{j=1}^5 p_{ij} \cdot m_{ij}$, $i=1, 2, \dots, 5$ получим вектор значений средних времен пребывания в каждом из состояний

$$t_1 = 1/\lambda_{12}, t_2 = 1/\lambda_{23}, t_3 = 2/(\lambda_{32} + \lambda_{34}), t_4 = 2/(\lambda_{43} + \lambda_{45}) \quad (6)$$

Также по аналогии с (3) составим систему уравнений для средних времен до попадания системы в состояние 5 (до аварии) при условии, что в настоящий момент времени система находилась в состоянии i ($i=1, 2, 3, 4$). Тогда по аналогии с системой уравнений (3) для нашего случая можно записать следующую систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1 = t_1 + T_2 = \frac{1}{\lambda_{12}} + T_2 \\ T_2 = t_2 + T_3 = \frac{1}{\lambda_{23}} + T_3 \\ T_3 = t_3 + p_{32} \cdot T_2 + p_{34} \cdot T_4 = \frac{2}{\lambda_{32} + \lambda_{34}} + \frac{\lambda_{32}}{\lambda_{32} + \lambda_{34}} T_2 + \frac{\lambda_{34}}{\lambda_{32} + \lambda_{34}} T_4 \\ T_4 = t_4 + p_{43} \cdot T_3 = \frac{2}{\lambda_{43} + \lambda_{45}} + \frac{\lambda_{43}}{\lambda_{43} + \lambda_{45}} T_3 \end{array} \right. \quad (7)$$

Замечание 3. Система уравнений (6) отличается от системы уравнений (3) появлением дополнительного (второго) слагаемого при определении значения T_3 , что обусловлено возможным опережающим управлением уровнем безопасности объекта (принятию некоторых превентивных мер в состоянии 3).

Подставляя T_2 и T_3 из второго и четвертого уравнений в третье уравнение системы (7) получаем

$$T_3 = \frac{2}{\lambda_{32} + \lambda_{34}} + \frac{\lambda_{32}}{\lambda_{32} + \lambda_{34}} \left(\frac{1}{\lambda_{23}} + T_3 \right) + \frac{\lambda_{34}}{\lambda_{32} + \lambda_{34}} \left(\frac{2}{\lambda_{43} + \lambda_{45}} + \frac{\lambda_{43}}{\lambda_{43} + \lambda_{45}} T_3 \right) \quad (8)$$

Откуда получаем:

$$T_3 = \left(\frac{2}{\lambda_{34}} + \frac{1}{\lambda_{23}} \cdot \frac{\lambda_{32}}{\lambda_{34}} \right) \left(\frac{\lambda_{43}}{\lambda_{45}} + 1 \right) + \frac{2}{\lambda_{45}} \quad (9)$$

Подставляя в (7), получаем:

$$\begin{aligned} T_4 &= \frac{2}{\lambda_{45}} + \frac{\lambda_{43}}{\lambda_{45}} \cdot \left(\frac{2}{\lambda_{34}} + \frac{1}{\lambda_{23}} \cdot \frac{\lambda_{32}}{\lambda_{34}} \right) \\ T_2 &= \frac{1}{\lambda_{23}} + \left(\frac{2}{\lambda_{34}} + \frac{1}{\lambda_{23}} \cdot \frac{\lambda_{32}}{\lambda_{34}} \right) \left(\frac{\lambda_{43}}{\lambda_{45}} + 1 \right) + \frac{2}{\lambda_{45}} \\ T_1 &= \frac{1}{\lambda_{12}} + \frac{1}{\lambda_{23}} + \left(\frac{2}{\lambda_{34}} + \frac{1}{\lambda_{23}} \cdot \frac{\lambda_{32}}{\lambda_{34}} \right) \left(\frac{\lambda_{43}}{\lambda_{45}} + 1 \right) + \frac{2}{\lambda_{45}} \end{aligned} \quad (10)$$

Замечание 4. Из формул (9) и (10) достаточно очевидно, что существенное влияние на время до аварии имеют, во втором случае уже два отношения $\lambda_{32}/\lambda_{34}$ и $\lambda_{43}/\lambda_{45}$, которые характеризуют интенсивность формирования воздействий по опережающему (превентивному) управлению уровнем безопасности объекта для состояний 3 и 4 [21, 22].

Оценка времени T_5 нахождения объекта в состоянии отказа (аварийном) не входит в поставленную задачу, т.к. оцениваются только времена до попадания объекта в аварийное состояние. Эта оценка, может быть получена только на основании анализа статистических данных.

Замечание 5. В рассматриваемой постановке задачи оценивается только время до попадания объекта в аварийное состояние, которое является локально поглощающим, причем после восстановления (полного) процесс повторяется заново.

Оценка стационарных вероятностей нахождения объекта в соответствующих состояниях, при различных вариантах управления безопасностью, будет отражена в последующих публикациях.

Пример. Рассмотрим реализацию модели мониторинга безопасности труда на примере переходов из одного состояния в другое при выполнении работ, связанных с повышенной опасностью – работы на высоте.

Оценка будет проводиться по критерию СИЗ (критерии описаны в статье Г.Е. Нам, О.В. Горбунова // XXI век: Итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 12. – № 1(61). – С. 90-97).

1 состояние – соответствует выполнению всех процедур, связанных с состоянием СИЗ для работы на высоте – это выдача, осмотр, технически исправное состояние, наличие сертификата соответствия требованиям ТР ТС, и др.

2 состояние – соответствует требованиям норм, но сроки эксплуатации (носки) близки к завершению, по критерию браковки (износа) условия выполняются, но есть ряд не критичных замечаний, например, небольшие потертости ленты силовой конструкции и текстильных точек присоединения.

3 состояние – например, допущено несоответствие СИЗ по критериям браковки: критичные потертости ленты силовой конструкции, вытянутые нити силовой прошивки страховочной системы и стропа. На данном этапе, согласно предложенной модели мониторинга, должны быть предприняты меры по устранению несоответствий – система выдает сигнал о принятии мер по замене СИЗ и недопуске к работам на высоте.

4 состояние – работник выполняет работы на высоте с применением СИЗ, которые характеризуются состоянием износа, описанным в состоянии 3. При нагрузках на страховочную систему при производстве работ происходит ухудшение состояния СИЗ, например, вытягивание петель нитей силовой прошивки и нагрузка на истертые участки – система выдает сигнал об остановке производства работ на высоте. Переход в 5 состояние недопустим.

Обсуждение. Были рассмотрены действующие системы мониторинга безопасности труда в строительной отрасли, анализ которых показал, что в их основе лежит устаревшая схема проведения обходов и осмотров строительной площадки согласно утвержденным графикам проведения контроля.

В результате были выявлены проблемы связанные с несвоевременностью поступления информации со строительных площадок о нарушениях требований законодательства по охране труда, что потенциально создает условия для травматизма и аварийности.

Поскольку традиционные подходы в управлении ОТ, в том числе и в осуществлении контроля, требуют огромных человеческих ресурсов для сбора и обработки большого количества данных, который отнимает как время, так и трудозатраты, становится очевидным, что в таком режиме невозможно выполнять оценку в реальном времени, тем самым упуская лучшее время для принятия решений по обеспечению безопасности труда. Ввиду этого необходимо использовать вычислительные методы,

способные обеспечить эффективное принятие решений по предупреждению аварийности и травматизма.

Для целей организации систем информационной поддержки управления безопасностью труда предлагается использовать инструменты позволяющие в режиме онлайн фиксировать нарушения требований охраны труда, обрабатывать эти данные и выдавать рекомендации, направленные на принятие превентивных мер.

В качестве таких инструментов может применяться ТИМ на основе цифрового двойника объекта строительства, в котором будет рассматриваться человеко-машинная среда как единая целая система.

Таким образом, всем участникам процесса строительства, в частности, лицам отвечающим за обеспечение требований ОТ на местах, будет доступна информация на электронных носителях (планшетах, смартфонах) о всех производимых работах и людях присутствующих на строительной площадке, о возможных коллизиях (например, одновременном протекании видов работ взаимоисключающих друг друга по требованиям безопасности), сдвигах одних этапов работ и замене их на другие работы, и т.д.

Важно отметить, что предложенная модель цифрового мониторинга задает траекторию перспективного развития по использованию ТИМ в охране труда с применением цифрового двойника, которую в дальнейшем можно совершенствовать с учетом специфики строительства и пожеланий потенциальных заказчиков.

Выводы. Действующие системы контроля и мониторинга за безопасностью труда на строительных площадках нашей страны недостаточно информативны и не могут в полной мере обеспечить требования законодательных документов в области ОТ по предупреждению травматизма и аварий.

Следующим этапом развития мониторинга является применение систем информационной поддержки управления безопасностью труда, направленных на принятие превентивных мер для обеспечения безопасности.

Предложенная математическая модель описывает состояния изучаемой системы с помощью аппарата полумарковских процессов, на основе которой построены вложенные матрицы переходов, позволяющих оценить значения среднего времени до наступления аварийного состояния.

Составленные графы перехода между состояниями объекта (различными уровнями безопасности) отличаются в системах уравнений [22] и в случае модифицированного графа, показанного на рисунке 4, продемонстрирована возможность принятия мер по опережающему (превентивному) управлению уровнем безопасности объекта для состояний 3 и 4, что в дальнейшем будет предложено для создания системы информационной поддержки управления безопасностью труда с применением ТИМ на основе цифрового двойника объекта строительства [23].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Ying Lu, Peizhen Gong, Yuchun Tang, Shuqi Sun, Qiming Li. BIM-integrated construction safety risk assessment at the design stage of building projects // Automation in Construction. – 2021. – Volume 124.
2. Приказ Министерства труда и социального развития Российской Федерации, Федеральная Служба по труду и занятости от 21.03.2019 N 77 "Об утверждении Методических рекомендаций по проверке создания и обеспечения функционирования системы управления охраной труда" [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/554207464> (дата обращения 28.09.2023).
3. Приказ Министерства труда и социального развития Российской Федерации от 29.10.2021 № 776н «Об утверждении Примерного положения о системе управления охраной труда» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/727092790> (дата обращения 28.09.2023)
4. Приказ Министерства труда и социального развития Российской Федерации от 31.01.2022 года № 37 «Об утверждении Рекомендаций по структуре службы охраны труда в организации и по численности работников службы охраны труда» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/728094912> (дата обращения 28.09.2023)
5. Приказ Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 29.10.2021 года № 771н «Об утверждении Примерного перечня ежегодно реализуемых работодателем мероприятий по улучшению условий и охраны труда, ликвидации или снижению уровней профессиональных рисков либо недопущению повышения их уровней» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/727092795> (дата обращения 25.08.2023)
6. Приказ Роструда от 01.02.2022 N 20 (ред. от 12.04.2023) "Об утверждении форм проверочных листов (списков контрольных вопросов) для осуществления федерального государственного контроля (надзора) за соблюдением трудового законодательства и иных нормативных правовых актов, содержащих нормы трудового права" (Зарегистрировано в Минюсте России 25.02.2022 N 67494) [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_410386/ (дата обращения 28.09.2023)
7. Единая общероссийская справочно-информационная система по охране труда: [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://eisot.rosmintrud.ru/monitoring-usloviy-i-okhrany-truda> (дата обращения: 27.09.2023)
8. Официальный сайт Международная программа «За безопасный труд». Библиотека безопасного труда: «Пособие по наблюдению за условиями труда на рабочем месте в промышленности. система Элмери» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://base.safework.ru/safework/navigator&srack=110listid%3D01000000100%26listpos%3D2%26lsz%3D9%26nd%3D444400008%26nh%3D0%26> (дата обращения 28.09.2023)
9. Стратегия «Агрессивное развитие инфраструктуры» [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://ancb.ru/files/ck/1618305869_Husnullin_i_Plan_Mishustina.pdf (дата обращения 28.09.2023)
10. Поручение Президента РФ № ПР-1235 от 19.07.2018 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://gasudata.lan.spbgasu.ru/docs/> (дата обращения 28.09.2023)
11. Постановление Правительства РФ №331 от 05.03.2021 (с изменениями от 20.12.2022 постановлением Правительства Российской Федерации от 20 декабря 2022 года №2357 (вступило в силу с 1 сентября 2023 года)) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://gasudata.lan.spbgasu.ru/docs/> (дата обращения 28.09.2023)
12. Шарманов В.В., Романович М.А. ТИМ – инструмент контроля, применяемый службой охраны труда // Техносферная безопасность Омск, 25 апреля 2022 года: Материалы Девятой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – О., 2022. – С. 148-151.
13. Шарманов В.В. Методика оценки факторов достижения безопасности на строительной площадке на основе информационного моделирования / В.В. Шарманов // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2017. – № 3(34). – С. 72-79. – EDN ZJRZLN.
14. ГОСТ Р 10.00.0002 «Единая система информационного моделирования. Термины и определения».
15. ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения».
16. Белов, С.В. Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды (техносферная безопасность): учебник для вузов / С.В. Белов. – 6-е изд., перераб. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2023. – 636 с. – (Высшее образование). – ISBN 978-5-534-16270-7. – Текст: электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. – URL: <https://urait.ru/bcode/530724> (дата обращения: 28.09.2023)
17. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. – Учеб. пособие для вузов. – 2е изд., стер. М.: Высш. шк., 2000. – 384 с.
18. Дифференциальные уравнения. Устойчивость и оптимальная стабилизация: учебное пособие для вузов / А.Н. Сесекин [и др.]; ответственный редактор А.Н. Сесекин; под научной редакцией А.Ф. Шорикова. – Москва: Издательство Юрайт, 2022. – 119 с. – (Высшее образование). – ISBN 978-5-534-08215-9. – Текст: электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. – URL: <https://urait.ru/bcode/493627> (дата обращения: 28.09.2023)
19. Барлоу Р., Прошан Ф. Математическая теория надежности. Пер. с англ. под ред. Б.В. Гнеденко. – М.: Советское радио, 1969. – 488 с.
20. Северцев, Н.А. Теория надежности сложных систем в отработке и эксплуатации: учебное пособие для вузов / Н.А. Северцев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2023. – 473 с. – (Высшее образование). – ISBN 978-5-534-12071-4. – Текст: электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. – URL: <https://urait.ru/bcode/515368> (дата обращения: 28.09.2023)
21. Аксенов, К.А. Системы поддержки принятия решений в 2 ч. Часть 1: учебное пособие для вузов / К.А. Аксенов, Н.В. Гончарова; под научной редакцией Л.Г. Доросинского. – Москва: Издательство Юрайт, 2022. – 103 с. – (Высшее образование). – ISBN 978-5-534-07640-0. – Текст: электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. – URL: <https://urait.ru/bcode/494072> (дата обращения: 28.09.2023)
22. Бурков Е.А. Качество информационных систем / П.И. Падерно, Е.А. Бурков, Н.А. Назаренко // Учебник. Издательство «Академия», 2015, 224 с. ил.
23. Миргородская, Е.О. Единая цифровая среда как система управления строительством / Е.О. Миргородская, Л.А. Тищенко // Пространственное развитие территорий в условиях цифровизации: социо-эколого-экономические системы: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Грозный, 08-09 декабря 2020 года. – Грозный: Спектр, 2020. – С. 35-39. – DOI 10.34708/GSTOU.CONF.2021.90.63.004. – EDN CVXCOG.

Статья публикуется по результатам проведения научно-исследовательской работы, проводимой в рамках конкурса грантов на выполнение научно-исследовательских работ научно-педагогическими работниками СПбГАСУ в 2023 году.

Статья поступила в редакцию 30.09.2023

Статья принята к публикации 15.12.2023

УДК 66.01:532; 539

EDN: CPQSQD

МОДЕРНИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ АДСОРБЕРА НА ОСНОВЕ СОРБЦИОННОЙ ОЧИСТКИ ВОДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАНУЛИРОВАННОГО СОРБЕНТА ОКСИД ГРАФЕНА-ХИТОЗАН

© Авторы 2023

SPIN: 6654-8702

AuthorID: 1125153

ЧЕЛЫШЕВА Валентина Павловна, аспирант высшей школы гидротехнического и энергетического строительства*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого**(Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, chelysheva.valya@yandex.ru)*

SPIN: 9964-2034

AuthorID: 439213

ORCID: 0000-0002-5914-6210

ScopusID: 57220085642

ПОЛИТАЕВА Наталья Анатольевна, доктор технических наук, профессор, профессор высшей школы гидротехнического и энергетического строительства*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого**(Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, politaevana1971@gmail.com)*

SPIN: 1159-95606

AuthorID: 109785

ORCID: 0000-0002-7151-5998

ScopusID: 56225536000

РОМАНОВ Михаил Васильевич, кандидат технических наук, доцент, доцент высшей школы гидротехнического и энергетического строительства*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого**(Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, rom@spbstu.ru)*

SPIN: 3014-8601

AuthorID: 99645

ORCID: 0000-0002-6056-6618

ScopusID: 6603631466

МОЛОДКИНА Людмила Михайловна, доктор технических наук, профессор, профессор высшей школы гидротехнического и энергетического строительства*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого**(Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, asminaster7@gmail.com)*

SPIN: 1182-6164

AuthorID: 678290

ORCID: 0000-0002-9558-7005

ScopusID: 57192975132

ЩУР Александр Васильевич, доктор, биологических наук, доцент, зав. кафедрой «Техносферная безопасность и производственный дизайн»*Белорусско-Российский университет,**(212000, Республика Беларусь, г. Могилев, проспект Мира, 43, Shchur@yandex.by)*

Аннотация. В данной работе изучены основные экологические проблемы использования водных ресурсов. Установлено, что наиболее перспективным методом очистки является адсорбционная очистка с применением в качестве оборудования – адсорберов. Проведен патентный поиск по основным типам конструкций промышленных адсорберов для очистки сточных вод и выявлены основные недостатки существующих моделей и сложности в их использовании. Выбраны модели адсорберов наиболее эффективные и удобные в эксплуатации. За аналог для создания усовершенствованной модели был использован патент: «Адсорбер вертикальный с неподвижным слоем адсорбента» ЛЕННИИХИММАШ. В качестве второго аналога рассматривали модель адсорбера, где распределительное устройство содержит плоский диск-экран, помещенный на сопле адсорбера вдоль его вертикальной оси, а на слой адсорбента помещается разделительная сетка со слоем керамических шариков. На основании аналогов была предложена модернизация конструкции адсорбера и разработана модель «АМЭ». Создан макет с масштабом 1:50, который исследовали на предмет очистки модельных сточных вод. В качестве загрузочного материала использовали сорбент на основе оксида графена и хитозана. Показано, что адсорбер «АМЭ», с загрузкой сорбента оксид графена-хитозан, обладает высоким сорбционным свойством и очищает воду от примесей двухвалентной меди на 97%.

Ключевые слова: очистка воды, адсорбер, сточные воды, тяжелые металлы, сорбенты, оксид графена, хитозан.

MODERNIZATION OF AN ADSORBER DESIGN BASED ON SORPTION WATER PURIFICATION USING GRANULAR SORBENT GRAPHENE OXIDE-CHITOSAN

© The Authors 2023

CHELYSHEVA Valentina Pavlovna, postgraduate student at the Higher School of Hydraulic and Energy Engineering

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

(Russia, 195251, St. Petersburg, st. Politekhnicheskaya, 29, chelysheva.valya@yandex.ru)

POLITAYEVA Natalya Anatolyevna, doctor of technical sciences, professor, professor of the Higher School of Hydraulic and Energy Engineering

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

(Russia, 195251, St. Petersburg, st. Politekhnicheskaya, 29, politaevana1971@gmail.com)

ROMANOV Mikhail Vasilievich, candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Higher School of Hydraulic and Energy Engineering

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

(Russia, 195251, St. Petersburg, st. Politekhnicheskaya, 29, rom@spbstu.ru)

MOLODKINA Lyudmila Mikhailovna, doctor of technical sciences, professor, professor of the Higher School of Hydraulic Engineering and Energy Construction

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

(Russia, 195251, St. Petersburg, st. Politekhnicheskaya, 29, asminaster7@gmail.com)

SHUR Alexander Vasilievich, doctor biological sciences, associate professor head department of «Technosphere Safety and Production Design»

Belarusian-Russian University

(212000, Republic of Belarus, Mogilev, Mira Avenue, 43. Shchur@yandex.by)

Abstract. This paper examines the main environmental problems of water resource use. It has been established that the most promising cleaning method is adsorption cleaning using adsorbers as equipment. A patent search was carried out on the main types of designs of industrial adsorbers for wastewater treatment and the main disadvantages of existing models and difficulties in their use were identified. The most efficient and easy-to-use adsorber models were selected. For an analogue, a patent was used to create an improved model: “Vertical adsorber with a fixed layer of adsorbent” LENNIKHIMMASH. As a second analogue, we considered an adsorber model, where the distribution device contains a flat disk-screen placed on the adsorber nozzle along its vertical axis, and a separating mesh with a layer of ceramic balls is placed on the adsorbent layer. Based on analogues, a modernization of the adsorber design was proposed and the “AME” model was developed. A model with a scale of 1:50 was created, which was examined for the treatment of model wastewater. A sorbent based on graphene oxide and chitosan was used as a loading material. It has been shown that the AME adsorber, loaded with graphene oxide-chitosan sorbent, has high sorption properties and purifies water from divalent copper impurities by 97%.

Keywords: water purification, adsorber, wastewater, heavy metals, sorbents, graphene oxide, chitosan.

Для цитирования: Чельшева В.П. Модернизация конструкции адсорбера на основе сорбционной очистки воды с использованием гранулированного сорбента оксид графена-хитозан /В.П. Чельшева, Н.А. Политаева, М.В. Романов, Л.М. Молодкина, А.В. Шур // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 12. – № 4(64). – С. 239-243. – EDN: CPQSQD.

Введение. Вода – важный природный ресурс, ценность которого возрастает с каждым годом. Несмотря на то, что большая часть поверхности Земли покрыта ей, пресной воды, то есть пригодной для питья и многих техпроцессов, менее 3% от этих запасов. [1]. Для очистки сточных вод разработано множество методов. Водные ресурсы принято считать воспроизводимыми, однако на момент 2004-го года Всемирная комиссия по воде констатировала, что более половины крупных рек мира «серьезно истощены и загрязнены, деградируют и отравляют окружающие их экосистемы, угрожая здоровью и жизнеобеспечению зависящего от них населения» [2]. У проблемы вододефицита есть несколько путей решения, таких как освоение новых источников пресной воды (подземные воды, воды вечной мерз-

лоты, очистка морской воды), введение политики рационального и экономичного потребления воды и др. Но не менее важным способом преодоления вододефицита является очистка отработанной воды. Для очистки воды используют различные методы, для более тонкой очистки рационально применения адсорбционной очистки, с использованием различных адсорбентов [3-5].

Адсорбция является универсальным методом, позволяющим практически полностью извлечь примеси из жидкой среды, применяется во многих отраслях промышленности, в том числе и для очистки сточной и питьевой воды [6].

Исходя из вышеперечисленного можно сказать, что адсорбционные фильтры – эффективны; востребованы; имеют большой срок работы. Именно

поэтому исследования по разработкам адсорбционных фильтров для очистки воды актуальны.

Цель данной работы явилось усовершенствование конструкции адсорбера для сорбционной очистки сточных вод.

Методология. Для подбора аналога нами были проведены патентные поиски по основным типам конструкций промышленных адсорберов для очистки сточных вод. После проведения анализа результатов патентного поиска были выявлены недостатки существующих моделей и трудности в реализации процессов очистки. Это исследование подтвердило актуальность разработок новых моделей адсорбционных установок для промышленного использования.

В качестве аналога «Адсорбер вертикальный с неподвижным слоем адсорбента» ЛЕННИИ ХИММАШ [7]. Исходная конструкция для газопереработки содержит вертикальный корпус, опорную решетку с насыпным слоем зернистого адсорбента, разделительные сетки и слои керамических шаров поверх сорбционного слоя. Штуцеры для подачи и отвода фильтруемого материала расположены в верхней и нижней части установки. Над сорбционным отсеком находится кольцевая горизонтальная перегородка с перфорациями разного диаметра. Перегородка в своей центральной части имеет конструкцию расширяющегося вверх конического стакана.

Процесс адсорбции осуществляется следующим образом: неочищенный газ подается через штуцер в верхней части установки и проходит через сорбционный слой сверху вниз. Регенерационный агент движется в обратном направлении – снизу вверх, так как скорость потока десорбента значительно ниже. Такая конструкция позволяет уменьшить физические взаимодействия между зернами сорбционного материала и предотвращает унос его частиц через верхний штуцер.

Однако в существующих конструкциях адсорберов есть несколько основных недостатков:

- необходимость остановки процесса фильтрации для регенерации сорбционного материала;
- неравномерность распределения жидкой фазы в слое адсорбента.

Вторым аналогом мы использовали модель авторов [8], где распределительное устройство содержит плоский диск-экран, помещенный на сопле адсорбера вдоль его вертикальной оси, а на слой адсорбента помещается разделительная сетка со слоем керамических шариков. При такой конструкции возникает неравномерное распределение потоков фильтруемого вещества в поперечном сечении через сорбционный материал и неполноценное использование сорбирующей поверхности. Кроме того, негерметичность прилегания разделительной сетки провоцирует перемешивание частиц сорбента с керамическими шариками (крупная фракция), которые, соответственно, стираются и оседают на

сорбционном материале. Таким образом, некоторая часть фильтрующей поверхности оказывается не функциональной.

Результаты и их обсуждение. Для устранения перечисленных выше недостатков нами была разработана модель адсорбера «АМЭ», где равномерность фильтрации обеспечивается распределительной трубкой, которая позволяет жидкой фазе полноценно взаимодействовать с сорбентом. Распределительная трубка также позволяет регулировать объем поступающей жидкости, увеличивая время контакта сорбента с сорбатом, и повышать эффективность очистки.

Для регенерации сорбента предлагаемая модель усовершенствована за счет соединения камер абсорбции и десорбции. Аналогом конструкции адсорбера, объединённых камер абсорбции и десорбции служила работа авторов [9]. Данная конструкция снабжена полым валом, куда через патрубок под давлением поступает регенерирующий агент, а конденсат, смешанный с адсорбатом, выводится через закрытый решеткой штуцер. Очищенный сорбционный материал попадает в камеру адсорбции. При совмещении камер адсорбции и десорбции сокращается время регенерации сорбента, он расходуется более экономично.

В разработанной нами модели «АМЭ» трубы для подачи и отвода фильтруемой жидкости также используются для транспортировки регенерационных растворов. Это существенно ускоряет процесс десорбции, обеспечивает многократное использование сорбента, а также позволяет сделать конструкцию более эргономичной.

Таким образом, разработанная нами адсорбционная установка «АМЭ» не только эффективно очищает сточные воды за счет своей конструкции и состава сорбционного материала, но и сокращает эксплуатационные затраты (металлоконструкции, энергозатраты и производственные площади).

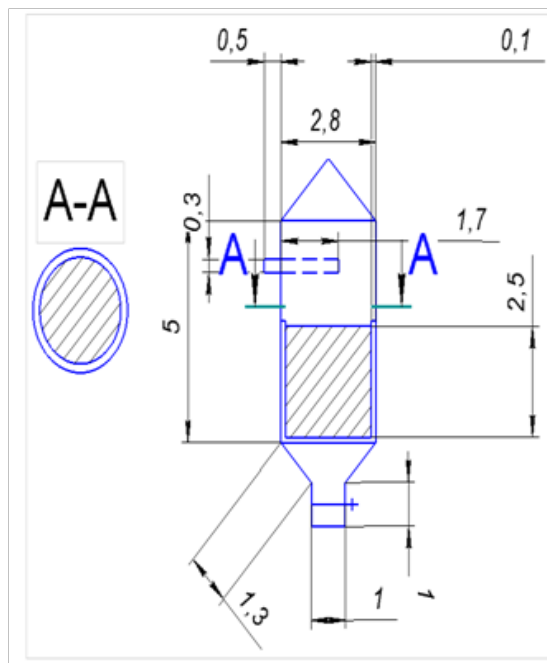
Одним из отличий разработанной конструкции «АМЭ» является сетка с подъёмным механизмом, которая позволит заменять сорбционный материал. Адсорбер оснащен распылительной трубой, чтобы загрязненная вода распределялась по всему объему сорбента.

На рисунке 1 представлены схематичный чертеж разработанного адсорбера «АМЭ», с указанными размерами адсорбера для промышленного использования. В программе *Autodesk Fusion 360* составлена 3D модель разработанного адсорбера «АМЭ».

В разработанной модели «АМЭ» верхняя крышка адсорбера выполняется с резьбой для герметичного использования. При выгрузке сорбционного материала ее можно будет открыть и поднять сетку для замены сорбента. Труба для подачи жидкости складывается внутри адсорбера к левой стенке, а поток очищенной воды будет регулироваться специальным клапаном (рис. 2).



а)



б)

Рисунок 1 – Чертежи адсорбера «АМЭ» в программах а-Autodesk Fusion 360; б- Компас 3д соответственно

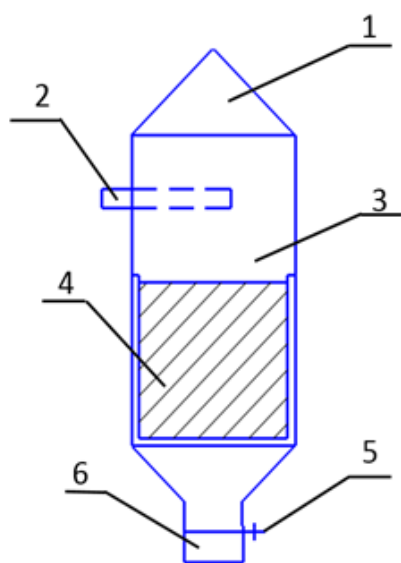


Рисунок 2 – Рисунок адсорбера «АМЭ»:
 1 – герметично закрывающаяся крышка адсорбера; 2 – складной входной патрубок с распылителем; 3 – корпус фильтра; 4 – сетка для СМ; 5 – клапан для регулирования потока жидкости; 6 – выходной патрубок

Для проверки работы адсорбера «АМЭ» нами была выполнена работающая модель в масштабе 1:50. Основная конструкция была сделана на лазерном станке из полиметилметакрилата. Трубы подачи и отвода жидкости изготовлены из силиконовых трубок диаметром 7 мм. Высота конструкции модели адсорбера составила 9,5 см, а с учетом труб подачи и отвода воды по 3 см, около 15, 5 см. Результаты работы представлены на рисунке 3.

В качестве сорбента использовали сорбционный материал на основе оксида графена и хитозана, разработанный нами в более ранних исследованиях

[10-12]. Данный сорбент выполнен методом покапельного гранулирования и в ходе испытаний показал высокие сорбционные свойства по отношению к тяжелым металлам.

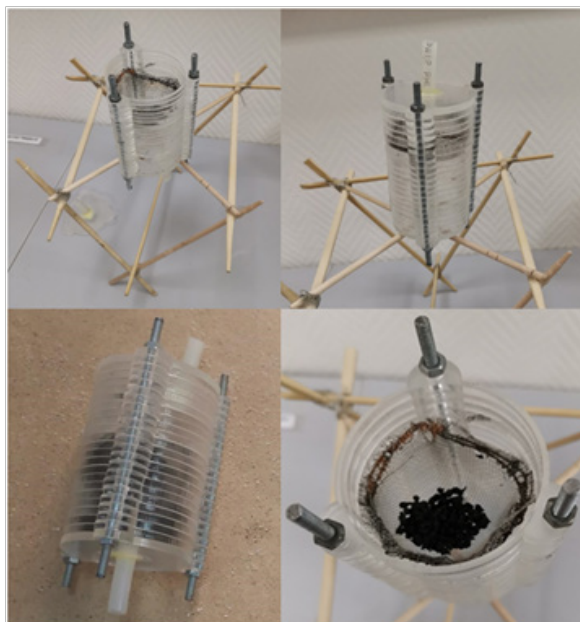


Рисунок 3 – Модель адсорбера в масштабе 1:50

В ходе работы были проведены исследования на эффективность очистки модельных сточных вод разработанной конструкции адсорбера «АМЭ» от катионов двухвалентной меди. Для этого в адсорбер засыпали 4 гр. сорбента и пропускали модельные сточные воды в динамическом режиме. Эффективность очистки воды от двухвалентной меди первого литра составила 97%. После пропускания 10 литров модельных стоков эффективность очистки снизи-

лась до 85%.

Выводы. Разработана модель адсорбера «АМЭ» соответствует основным критериям для современной промышленной очистки сточных вод. Разработанный адсорбер с подъемной сеткой, обеспечивает более эффективную регенерацию сорбента. В усовершенствованной модели адсорбера для подачи/отвода воды и кислоты для регенерации сорбента используются одни и те же трубы, что упрощает эксплуатацию оборудования. Такой прием существенно сокращает капитальные и эксплуатационные затраты, при этом достигается экономия металлоконструкций, электроэнергии и производственных площадей.

Доказано, что адсорбер с загрузкой сорбционного материала – оксид графена-хитозан способен очистить сточную воду от примесей двухвалентной меди на 97%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Water in Crisis A Guide to the World's Fresh Water Resources / Edited by Peter H. Gleick; Foreword by Gilbert F. – New York: Oxford University Press. 1993. – 504 p.

2. Глобальная экологическая перспектива: Прошлое, настоящее и перспективы на будущее: доклад ЮНЕП. 3 / Программа ООН по окружающей среде; редактор русского издания Г.Н. Голубев. – М.: Интердиалект+, 2002. – 504 с.

3. Очистка сточных вод с применением хитозана / Тарановская Е.А., Собгайда Н.А., Алферов И.Н., Морев П.В. // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2015. – № 10 (185). – С. 322-325.

4. Сорбенты на основе отходов агропромышленного комплекса для очистки сточных вод / Чиркова В.С., Собгайда Н.А., Рзаде Ф.А. // Вестник Технологического университета. – 2015. – Т. 18. – №20. – С. 263-266.

5. Очистка сточных вод от ионов тяжелых металлов с помощью сорбентов-отходов деревообрабатывающей и сельскохозяйственной отраслей промышленности / Собгайда Н.А., Ольшанская Л.Н., Макарова Ю.А. // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2009. – № 9. – С. 43.

6. Кельцев, Н.В. Основы адсорбционной техники. – М.: Химия, 1984. – 592 с.

7. Пат. 2530112 Российская Федерация, МПК В 01 D 53/04 (2006.01). Адсорбер вертикальный с неподвижным слоем адсорбента [Электронный ресурс] / Бессонный Е.А., Машковцев П.Д., Михайлов А.В., Сидоров В.М.; заявитель и патентообладатель ООО «ЛЕННИИХИММАШ» – №2012134380/05; заявл. 10.08.12; опубл. 10.10.2014, Бюл. №28 URL: <https://www.fips.ru/iiss/document>.

8. Новейшие технологии освоения месторождений углеводородного сырья и обеспечение безопасности экосистем Каспийского шельфа: материалы XII Международной научно-практической конференции, Астрахань, 3 сентября 2021 года / Астрахан. гос. техн. ун-т. – Астрахань: Изд-во АГТУ, 2021. – 177-179 с.

9. Саипов, А.А. Новая конструкция адсорбера с движущимся слоем для очистки сточных вод / М.А. Пименова, Е.Б. Алексеик // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». – 2015. – С 1-3.

10. Politayeva N. et al. Graphene oxide-chitosan composites for water treatment from copper cations //Water. – 2022. – Т. 14. – №. 9. – С. 1430.

11. Politayeva, N.A., Chelysheva, V.P., Abdhussain, A.-F.F.H. Sorption. Material Based on Chitosan, Decorated With Graphene Oxide for Purification of Waste Water from Copper Cations. Ecology and Industry of Russiathis link is disabled, 2022, 26(8), pp. 22-27.

12. Сорбционные свойства материалов на основе хитозана и углеродных добавок / Н.А.Политаева, Ю.А. Смятская, В.В. Слугин [и др.] // Вестник Технологического университета. – 2017. – Т. 20. – № 23. – С. 100-103.

Работа выполнена за счет средств госзадания по теме «Реализация комплекса мер по повышению эффективности деятельности Российско-Армянского (Славянского) и Белорусско-Российского университетов»

Статья поступила в редакцию 24.10.2023

Статья принята к публикации 15.12.2023

УДК 331.453

EDN: EECBSF

ВНЕДРЕНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЁТА КАТЕГОРИИ РИСКА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТРЕХСТУПЕНЧАТОГО КОНТРОЛЯ ПО ОХРАНЕ ТРУДА

© Автор(ы) 2023

AuthorID: 9967-4239

ORCID: 0000-0001-5045-6282

ResearcherID: L-6450-2018

ScopusID: 57210920516

РУМЯНЦЕВА Нина Вячеславовна, кандидат технических наук,

доцент Высшей школы техносферной безопасности Инженерно-строительного института

Санкт-Петербургский политехнический университет

(194064, Россия, Санкт-Петербург, улица Политехническая, 29, e-mail: rumyantseva_nv@spbstu.ru)

ScopusID: 6601936733

SPIN-код: 1480-2859,

AuthorID: 818734

ORCID:0000-0001-6215-2403

ResearcherID: ABI-4436-2020

БУРЛОВ Вячеслав Георгиевич, доктор технических наук,

профессор Высшей школы техносферной безопасности Инженерно-строительного института

Санкт-Петербургский политехнический университет

(194064, Россия, Санкт-Петербург, улица Политехническая, 29, e-mail: burlov_vg@spbstu.ru)

Scopus ID: 57212259662

ORCID: 0000-0003-0833-6863

КОЛЕСНИКОВ Евгений Юрьевич, доктор технических наук,

профессор Высшей школы техносферной безопасности Инженерно-строительного института

Санкт-Петербургский политехнический университет

(194064, Россия, Санкт-Петербург, улица Политехническая, 29, e-mail: kolesn_eyu@spbstu.ru)

КРАСИЛЬНИКОВ Алексей Игоревич, магистр Высшей школы техносферной безопасности

Санкт-Петербургский политехнический университет

(194064, Россия, Санкт-Петербург, улица Политехническая, 29, e-mail: krasilnikov.ai@edu.spbstu.ru)

Аннотация. В данной работе была предложена методика расчета категории риска для структурных подразделений в организациях. Расчет категории риска является важным этапом в управлении структурным подразделением, поскольку он позволяет определить уровень возможных рисков и определить необходимость принятия мер для их снижения. В процессе разработки методики были учтены различные факторы, такие как сложность процессов, наличие необходимых ресурсов, квалификация персонала, уровень контроля и многое другое. Полученная категория риска может быть высокой, умеренной или низкой. Если структурное подразделение получило высокую категорию риска, то необходимо принимать срочные меры для устранения возможных проблем и снижения рисков. В случае умеренной категории риска следует разработать план мероприятий для предотвращения возможных рисков и опасных ситуаций. А при получении низкой категории риска, структурное подразделение может продолжать работать в обычном режиме без дополнительных мер. Методика расчета категории риска может быть использована в различных отраслях, таких как производство, транспорт, строительство и другие. Она позволяет руководителям отдела охраны труда распределять временной ресурс с учетом рассчитанной категории риска и принимать обоснованные решения по улучшению условий труда на рабочих местах, что повышает эффективность работы организации в целом.

Ключевые слова: охрана труда, риск-ориентированный подход, надзор за соблюдением безопасности труда, потенциальный риск, методика по отнесению деятельности к категории риска, структурное подразделение.

INTRODUCTION OF A METHODOLOGY FOR CALCULATING THE RISK CATEGORY FOR THREE-STAGE LABOR PROTECTION CONTROL

© The Authors 2023

RUMYANTSEVA Nina Vyacheslavovna, candidate of technical sciences,

associate professor of the Higher School of Technosphere Safety of the Institute of Civil Engineering

St. Petersburg Polytechnic University

(194064, Russia, Saint Petersburg, Politechnicheskaya Street, 29, e-mail: rumyantseva_nv@spbstu.ru)

BURLOV Vyacheslav Georgievich, doctor of Technical Sciences,

professor of the Higher School of Technosphere Safety of the Institute of Civil Engineering

St. Petersburg Polytechnic University

(194064, Russia, Saint Petersburg, Politechnicheskaya Street, 29, e-mail: burlov_vg@spbstu.ru)

KOLESNIKOV Evgeny Yurievich, doctor of technical sciences,
professor of the Higher School of Technosphere Safety of the Institute of Civil Engineering
St. Petersburg Polytechnic University
(194064, Russia, Saint Petersburg, Politechnicheskaya Street, 29, e-mail: kolesn_eyu@spbstu.ru)

KRASILNIKOV Alexey Igorevich, master of the higher school of Technosphere Safety
St. Petersburg Polytechnic University
(194064, Russia, Saint Petersburg, Politechnicheskaya Street, 29, e-mail: krasilnikov.ai@edu.spbstu.ru)

Abstract. In this paper, a methodology for calculating the risk category for structural units in organizations was developed. The calculation of the risk category is an important stage in the management of a structural unit, since it allows you to determine the level of possible risks and determine the need to take measures to reduce them. In the process of developing the methodology, various factors were taken into account, such as the complexity of processes, the availability of necessary resources, the qualifications of personnel, the level of control and much more. The resulting risk category can be high, moderate or low. If a structural unit has received a high risk category, it is necessary to take urgent measures to eliminate possible problems and reduce risks. In the case of a moderate risk category, an action plan should be developed to prevent possible risks and dangerous situations. And upon receipt of a low risk category, the structural subdivision can continue to operate as usual without additional measures. The methodology for calculating the risk category can be used in various industries, such as manufacturing, transport, construction and others. It allows the heads of structural divisions to make informed decisions to improve working conditions in the workplace and improve the efficiency of the organization as a whole.

Keywords: occupational safety, risk-oriented approach, supervision of occupational safety, potential risk, methodology for classifying activities as risk, structural unit.

Для цитирования: Румянцева Н.В. Внедрение методики расчёта категории риска для проведения трехступенчатого контроля по охране труда / Н.В. Румянцева, В.Г. Бурлов, Е.Ю. Колесников, А.И. Красильников // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 12. – № 4(64). – С. 244-249. – EDN: EECBSF

Введение. Одним из важных элементов эффективного функционирования системы управления охраной труда на предприятиях является осуществление контроля за выполнением требований безопасности на рабочих местах. На сегодняшний день работодателя не ограничивают в выборе метода или подхода для проведения контроля в структурных подразделениях. Для решения проблемы организации контроля за состоянием условий труда на рабочих местах, соблюдением работниками необходимых требований охраны труда, а также за правильностью применения средств индивидуальной и коллективной защиты чаще всего используется трехступенчатый контроль. Переход на риск-ориентированный подход при проведении мероприятий контроля по охране труда, позволит учитывать ограниченность ресурсов и времени специалистов, отвечающих за безопасность труда. Риск-ориентированный подход позволяет определить необходимость технических и организационных мер профилактики и защиты, что является рациональным использованием ресурсов [1-6].

За основу расчетов был выбран подход, осуществляемый органами надзора и контроля в сфере труда, но адаптированный для внутреннего использования в структурных подразделениях организации. Для определения категории риска рекомендуется использовать следующие критерии:

- наличие рабочих мест, где по результатам оценки риска был определен высокий уровень профессионального риска;
- наличие вредного класса условий труда на рабочем месте;

- наличие выявленных нарушений при предыдущих проверках;
- стаж работников;
- потенциальный риск причинения вреда в сфере труда.

Важно также учитывать индивидуальные характеристики работников при оценке риска на рабочем месте.

Выбор именно данных критериев обусловлен их влиянием на уровень безопасности, что требует более внимательной оценки и контроля. Для обеспечения безопасности на рабочих местах с высоким уровнем профессионального риска необходимо проводить регулярные обучения и тренинги по правилам охраны труда, обеспечивать соответствующее оборудование и средства индивидуальной защиты, проводить регулярные проверки на соответствие нормам безопасности и создавать культуру безопасности на производстве.

Если на рабочем месте есть вредные условия труда, это может привести к развитию у работников заболеваний профессионально обусловленных. Работодатель обязан проконтролировать обеспеченность, правильность использования своими сотрудниками выданных средств индивидуальной защиты в соответствии с требованиями ТК РФ и нормативными актами охраны труда.

Наличие выявленных и своевременно не устранённых нарушений при прошлых проверках также может негативно влиять на безопасность рабочих. Поэтому важно осуществлять контроль, чтобы принятие мер по обнаруженным недостаткам в безопасности выполнения работ не имело эффекта

запаздывания, внедрять регулярные проверки и анализы рисков для обеспечения безопасности на предприятии.

Важно следить за состоянием рабочей среды и принимать меры для обеспечения безопасности на производстве.

Методология. Целью статьи является обоснование периодичности проведения внутренних контрольных мероприятий по выполнению требований безопасности труда на рабочих местах в структурных подразделениях. Представлены рекомендации по внедрению риск-ориентированного подхода на примере проведения трехступенчатого контроля. В результате проведения расчета отдельных предложенных авторами показателей определяется общий уровень безопасности структурного подразделения, значение которого является основанием для более внимательного осуществления контроля вопросов безопасности труда структурного подразделения.

Методологической основой предложенного подхода являются методические рекомендации [3], используемые органами контроля и надзора. Для внедрения на уровне предприятия авторами были предложены критерии, которые доработаны и адаптированы под особенности внутреннего контроля структурных подразделений предприятия.

Результаты. При разработке предложенной методики для структурного подразделения используется методика расчета категории риска для всего объекта, которая дополняется несколькими важными критериями, чтобы соответствовать характеру и объему рассматриваемого подразделения [7-11]. Эта методика учитывает все необходимые критерии, условия труда, количество и опыт работников, и другие факторы. Определение категории риска структурного подразделения основывается на показателе "Потенциальный риск причинения вреда в сфере труда" – P . Ниже представлена разработанная методика, в которой значения потенциального риска представлены в таблице 1:

Таблица 1 – Значения потенциального риска

Категория риска	Значение потенциального риска
Высокий	1 и более
Умеренный	От 0,99 до 0,25
Низкий	Менее 0,24

1. Показатель потенциального риска определяется формулой (1):

$$P = K_y + K_t + K_c \quad (1)$$

где K_y – коэффициент устойчивости выполнения требований охраны труда работников структурного подразделения;

K_t – коэффициент показателя потенциального риска причинения вреда в сфере труда;

K_c – коэффициент показателя стажа работников в рассматриваемом структурном подразделении.

2. Коэффициент устойчивости выполнения

требований охраны труда работниками структурного подразделения выражает степень соблюдения ими указанных требований.

Его можно определить на основе информации, полученной в процессе проведения трехступенчатого инструктажа, специальной оценки условий труда, анализа профессиональных рисков на рабочих местах и других показателей деятельности структурного подразделения, которые доступны управлению (службе) охраны труда.

Коэффициент устойчивости можно определить по следующей формуле (2):

$$K_y = K_{op} + K_{yt} + K_{adm} \quad (2)$$

где K_{op} – коэффициент, который показывает наличие или отсутствие рабочих мест с высоким уровнем профессионального риска (табл. 2);

K_{yt} – коэффициент, который показывает наличие или отсутствие рабочих мест с вредными условиями труда (табл. 3);

K_{adm} – индивидуальный коэффициент, который указывает на наличие или отсутствие факта выявленных нарушений при предыдущих проверках (табл. 4):

Таблица 2 – Индивидуальный коэффициент наличия рабочих мест с высоким уровнем профессионального риска

Наличие/отсутствие РМ с высоким уровнем профессионального риска	K_{op}
+	0,3
-	0

Таблица 3 – Индивидуальный коэффициент наличия рабочих мест с вредными условиями труда

Наличие/отсутствие РМ с вредными условиями труда	K_{yt}
+	0,3
-	0

Таблица 4 – Индивидуальный коэффициент при наличии факта выявления нарушений требований охраны труда в структурном подразделении

Нарушение требований в сфере труда	K_{adm}
+	0,1
-	0

Коэффициенты для указанных показателей были получены из методики, используемой для определения общей категории риска объекта. При этом было принято решение о том, что вес каждого показателя для объекта и его структурных подразделений одинаков.

Если в результате трехступенчатого контроля не было выявлено нарушений, комиссия, ответственная за присвоение категории риска структурным подразделениям, может принять решение об уменьшении категории риска для данного подразделения.

3. Индивидуальный коэффициент показателя потенциального риска причинения вреда в сфере труда в структурном подразделении при наличии случаев травматизма (K_m) рассчитывается по

формуле (3):

$$K_T = K_{TT} + K_{TL} + K_{TM} \quad (3)$$

где K_{TT} – показатель, представляющий количество тяжелых несчастных случаев (ТНС) в структурном подразделении, признанных связанными с производством, за год, предшествующий текущему (табл. 5).

Таблица 5 – Показатель наличия тяжелых несчастных случаев

K_{TT}	Количество ТНС
0,4	1
$0,4 \cdot 2$	2
$0,4 \cdot n$	n

K_{TL} – показатель наличия легких несчастных случаев (ЛНС), в структурном подразделении признанных связанными с производством, за год, предшествующий текущему (табл. 6).

Таблица 6 – Показатель наличия легких несчастных случаев

K_{TL}	Количество ЛНС
0,04	1
$0,04 \cdot 2$	2
$0,04 \cdot n$	n

K_{TM} – показатель наличия микротравм (МТР) в структурном подразделении, признанных связанными с производством, за год, предшествующий текущему (табл. 7).

Таблица 7 – Показатель наличия микротравм

K_{TM}	Количество МТР
0,004	1
$0,004 \cdot 2$	2
$0,004 \cdot n$	n

Коэффициент для показателя, представляющий количество тяжелых несчастных случаев, был взят из методики для расчета категории риска для структурного подразделения. Коэффициенты для показателей легких несчастных случаев и микротравм были определены на основе пирамиды Генриха, которая отражает зависимость между количеством и тяжестью несчастных случаев. Чтобы обеспечить равный вес показателей, произведение коэффициента и числа для каждого показателя должно быть одинаковым. Например, 30 тяжелых несчастных случаев эквивалентны 300 легким несчастным случаям и 3000 микротравмам [12].

Коэффициент стажа работников в структурном подразделении. Отражает стаж сотрудников, который влияет на количество несчастных случаев, рассчитывается по формуле (4):

$$K_c = K_3 + K_{10} + K_{10+} \quad (4)$$

где K_3 – показатель, который показывает количество работников со стажем до 3 лет в структурном подразделении (табл. 8);

K_{10} – показатель, который показывает количество работников со стажем от 3 до 10 лет в структурном подразделении (табл. 9);

Таблица 8 – Показатель количества работников со стажем до 3 лет

K_3	Количество работников со стажем до 3 лет
0,005	1
$0,005 \cdot 2$	2
$0,005 \cdot n$	n

Таблица 9 – Показатель количества работников со стажем от 3 до 10 лет

K_{10}	Количество работников со стажем от 3 до 10 лет
0,002	1
$0,002 \cdot 2$	2
$0,002 \cdot n$	n

K_{10+} – показатель, который показывает количество работников со стажем более 10 лет в структурном подразделении (табл. 10);

Таблица 10 – Показатель количества работников со стажем более 10 лет

K_{10+}	Количество работников со стажем более 10 лет
0,003	1
$0,003 \cdot 2$	2
$0,003 \cdot n$	n

Коэффициенты, связанные со стажем сотрудников были получены на основе статистических данных по производственному травматизму в организациях.

Количество несчастных случаев с тяжелым исходом работников в зависимости от стажа работников представлено ниже (табл. 11):

Таблица 11 – Распределение пострадавших от несчастных случаев по стажу работы

K_{10+}	Количество работников со стажем более 10 лет
0,003	1
$0,003 \cdot 2$	2
$0,003 \cdot n$	n

Согласно статистике, имеется связь между опытом работников и количеством несчастных случаев [14]. Для расчета коэффициента были учтены только тяжелые случаи, поскольку в случае смертельного исхода подразделение автоматически получает высокую категорию риска. На основании этой статистики были вычислены коэффициенты, для чего был определен вес каждого стажа в зависимости от количества тяжелых происшествий от общего числа всех случаев.

Для стажа до 3 лет коэффициент будет равен $21:43 = 0,5$

Для стажа от 3 до 10 лет коэффициент будет равен $9:43 = 0,2$

Для стажа от 3 до 10 лет коэффициент будет равен $11:43 = 0,3$

И для данной методики, определяя вес K_c , необходимо разделить полученные коэффициенты на 100.

Если в организации произошел смертельный

несчастный случай в год, предшествующий расчетному (или текущему), то расчет категории риска структурного подразделения не проводится. такому подразделению автоматически присваивается категория высокого риска, которая не может быть снижена за счет мероприятий по охране труда и других действий внутри подразделения.

Обсуждение. Периодичность проведения проверок структурного подразделения в рамках трехступенчатого контроля определяется на основе уровня или категории риска, полученного при оценке. Если уровень риска высокий, необходимо проводить проверки еженедельно, чтобы снизить вероятность возникновения опасных ситуаций и несчастных случаев на производстве. При умеренном уровне риска достаточно проводить проверки раз в две недели для контроля соблюдения правил охраны труда и предотвращения нарушений. При низком уровне риска проверки не требуются, так как вероятность возникновения опасных ситуаций и несчастных случаев на производстве минимальна. Таблица 12 также демонстрирует вариант периодичности проверок в зависимости от категории риска.

Таблица 12 – Зависимость между категорией риска и периодичностью проверок

Категория риска	Значение потенциального риска	Периодичность проверок
Высокий	1 и более	1 раз в неделю
Умеренный	От 0,99 до 0,25	1 раз в 2 недели
Низкий	Менее 0,24	Не проводятся

Соответствие периодичности проверок определенной категории риска, представленное в таблице, позволяет распределить ограниченные ресурсы (время, экономические затраты на мероприятия по охране труда) в зависимости от структурного подразделения. Структурные подразделения с высоким уровнем риска нуждаются в выделении больших средств на решение проблем с безопасностью, например, закупку специальной техники, повышение квалификации сотрудников, внедрение новых систем безопасности, регулярный контроль и устранение причин возникновения опасных ситуаций, использование более совершенных средств защиты, проведение проверок и анализа причин опасных ситуаций, внедрение других мероприятий, направленных на снижение категории риска. Это позволит снизить количество случаев травмирования на рабочем месте и уменьшить риск в структурном подразделении и на предприятии в целом.

Выводы. В статье авторами рассмотрен вариант внедрения риск ориентированного подхода для внутреннего контроля на предприятии. Представленная методика опирается на ряд показателей, которые являются своеобразными индикаторами безопасности труда: данные о профессиональном риске и условиях труда, статистические данные о случаях травматизма всех

видов и др. Руководитель подразделения своими управленческими действиями может влиять на значение данных показателей, тем самым выводя свое подразделение на лидирующие позиции по безопасности. Суммарно показатели в комплексе определяют категорию структурного подразделения и позволяют уже специалисту по охране труда сконцентрировать внимание и усилия на более уязвимых, с точки зрения безопасности труда, подразделениях. Для достижения эффекта от внедрения риск ориентированного подхода, основанный на нем контроль, должен быть постоянным и системным процессом, который позволяет своевременно выявлять и устранять потенциальные опасности на рабочем месте, а также вовлекать работников в решение вопросов безопасности на предприятии, повышать уровень культуры безопасности.

Предложенная методика помогает определять категорию риска и правильно планировать финансирование мероприятий по охране труда для снижения категории риска структурного подразделения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Федеральный закон "О внесении изменений в Трудовой кодекс Российской Федерации" от 02.07.2021 N 311-ФЗ. Документы. КонсультантПлюс [Электронный ресурс]. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_389002/
2. Постановление Правительства РФ от 21 июля 2021 г. N 1230 "Об утверждении Положения о федеральном государственном контроле (надзоре) за соблюдением трудового законодательства и иных нормативных правовых актов, содержащих нормы трудового права". Документы. КонсультантПлюс [Электронный ресурс]. - URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_391463/
3. Методические рекомендации МР 5.1.0116-17 "Риск-ориентированная модель контрольно-надзорной деятельности в сфере обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия. Классификация хозяйствующих субъектов, видов деятельности и объектов надзора по потенциальному риску причинения вреда здоровью человека для организации плановых контрольно-надзорных мероприятий" (утв. Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека 11 августа 2017 г.)
4. ТК РФ Статья 226. Микроразрывы (микротравмы). Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 19.12.2022) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.03.2023). Документы. КонсультантПлюс [Электронный ресурс]. - URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34683/
5. Rummyantseva N., Kaverzneva, T., Uljanov, A., Belina, N.. Use of the logical-statistical model as a procedure for assessing occupational risks in the OSH management. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 666(1), 012091.
6. Румянцева, Н.В., Лобанова М.Н. Значение микротравм в процедуре оценки профессиональных рисков Безопасность в чрезвычайных ситуациях сборник научных Всероссийской научно-практической конференции. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. –2018. –С. 39-43.
7. Тарасов А.Д., Монахова З.Н. Оценка профессиональных рисков. Вестник науки. –2023. –№1 (58).
8. Кляуззе, В.П. Организация предоставления средств индивидуальной защиты. Экономический вестник университета. Сборник научных трудов ученых и аспирантов. –2014. –№22-1.
9. Абикинова, Ш.К., Джумагулова, Н.Г., Абдрахманова, Н.Б. Обеспечение работников средствами индивидуальной

защиты на основе риск-ориентированного подхода. *Ceteris paribus*. – 2022. – №1.

10. Желудкова В.В., Репин А.А. Особенности охраны труда работников, работающих во вредных условиях труда. *Вестник магистратуры*. – 2019. – №10-4 (97).

11. Мальшкіна, Е.Е. Особенности правового регулирования деятельности Федеральной инспекции труда как субъекта защиты трудовых прав работников. *Вестник ВГУ. Серия: Право*. – 2009. – №1.

12. Сапфилова, А.А. Правовые основы взаимодействия федеральной инспекции труда с работниками и работодателями. *Современная научная мысль*. – 2015. – №5.

13. Carroll, J.S., Pfeiffer, Y., Nowak, H., & Friis, S. (2022). The variety of beliefs about the causes of safety among safety practitioners. *Safety Science*, 148 doi:10.1016/j.ssci.2021.105641

14. Варнакова, Е.А. (2019) Возможные причины и последствия аварии в технологических процессах с нагретым битумом *Modern Science* № 4-3. – С. 162-166.

Статья поступила в редакцию 20.10.2023

Статья принята к публикации 15.12.2023

УДК 331.45/613.6

EDN: DUGIRB

АНАЛИЗ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ТРАВМАТИЗМА В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ОТРАСЛИ

© Автор(ы) 2023

SPIN: 8636-1383

AuthorID: 579701

ORCID: 0000-0002-0497-9960

ResearcherID: ABD-1566-2021

ScopusID: 57219088070

КОНТАРЕВА Валентина Юрьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры

«Безопасность жизнедеятельности, механизация и автоматизация технологических процессов и производств»

Донской государственной аграрной университет

(346493, Россия, Ростовская область, Октябрьский район, поселок Персиановский, улица Кривошлыкова, 24,

e-mail: valia_k@bk.ru)

SPIN: 6572-3167

AuthorID: 508899

ORCID: 0000-0002-7743-4144

ResearcherID: K-6371-2015

БЕЛИК Светлана Николаевна, кандидат медицинских наук, доцент кафедры «Общая гигиена»

Ростовский государственный медицинский университет

(344022, Российская Федерация, Ростовская область, г. Ростов-на-Дону, переулок Нахичеванский, 29,

e-mail: superbelik@mail.ru)

Аннотация. Сельскохозяйственная отрасль признана одной из наиболее опасных в отношении производственного травматизма, как в нашей стране, так и за рубежом. В сельском хозяйстве задействована значительная часть работоспособного населения страны, а несчастные случаи приводят к долгосрочным последствиям в результате рабочих и экономических потерь. В качестве первопричин травматизма следует отметить состояние условий труда в сельском хозяйстве, где более 1/3 численности работников за наблюдаемый период 2018-2022 гг осуществляют свои трудовые функции в условиях не отвечающих требованиям нормативно-правовой документации, т.е. во вредных и опасных условиях под воздействием факторов производственной среды и трудового процесса. Основными источниками травм в сельском хозяйстве являются крупный рогатый скот, сельхозтехника и машины, ручные инструменты. Причины производственного травматизма многочисленны и зависят от многих факторов: пола, возраста, стажа работы, квалификации, мотивации, вида работы и способа выполнения работы, организации, условий труда, социально-экономических факторов и др. Несмотря на то, что статистические данные свидетельствуют о тенденции к снижению общего числа пострадавших от производственных травм, что связано как со снижением численности предприятий сельхозотрасли, так и уменьшением численности сотрудников, а также с ростом расходов на мероприятия по охране труда, следует отметить недостоверность статистических данных, связанную с нарушением порядка предоставления данных, их несвоевременность, недостоверность или полное сокрытие несчастных случаев предприятиями в силу высокой финансовой затратности для собственников. Кроме этого в статистике не ведется учет малых и микропредприятий, а следовательно, не учитываются и случаи производственного травматизма на них.

Ключевые слова: производственный травматизм, сельское хозяйство, виды травматизма, причины травматизма, мероприятия по охране труда, условия труда, факторы производственной среды, факторы трудового процесса.

ANALYSIS OF OCCUPATIONAL INJURIES IN THE AGRICULTURAL INDUSTRY

© The Author(s) 2023

KONTAREVA Valentina Yuryevna, candidate of technical sciences, associate professor of the department

«Life safety, mechanization and automation of technological processes and productions»

Don State Agrarian University

(346493, Russia, Rostov region, Oktyabrsky district, Persianovsky settlement, Krivoslykova Street, 24,

e-mail: valia_k@bk.ru)

BELIK Svetlana Nikolaevna, candidate of medical sciences, associate professor of the department of general hygiene

Rostov State Medical University

(Rostov-on-Don, Nakhichevansky Lane, 29, 344022, Rostov Region, Russian Federation, Rostov-on-Don,

e-mail: okt@rostgmu.ru)

Abstract. The agricultural industry is recognized as one of the most dangerous in terms of occupational injuries, both in our country and abroad. Agriculture employs a large portion of the country's working population, and accidents have long-term consequences through labor and economic losses. As the root causes of injuries, it should be noted the state of working conditions in agriculture, where more than 1/3 of the number of workers during the observed period 2018-2022

carry out their labor functions in conditions that do not meet the requirements of regulatory documentation, i.e. in harmful and dangerous conditions under the influence of factors in the production environment and the labor process. The main sources of injuries in agriculture are cattle, agricultural equipment and machinery, and hand tools. The causes of industrial injuries are numerous and depend on many factors: gender, age, work experience, qualifications, motivation, type of work and method of performing work, organization, working conditions, socio-economic factors and others. Despite the fact that statistical data indicate a downward trend in the total number of victims of work-related injuries, which is associated both with a decrease in the number of agricultural enterprises and a decrease in the number of employees, as well as with an increase in costs for labor protection measures, it should be noted that the statistical data is unreliable associated with violation of the procedure for providing data, their untimeliness, unreliability or complete concealment of accidents by enterprises due to the high financial cost for owners. In addition, statistics do not keep records of small and micro enterprises, and therefore, cases of occupational injuries at them are not taken into account.

Keywords: industrial injuries, agriculture, types of injuries, causes of injuries, labor protection measures, working conditions, factors of the working environment, factors of the labor process.

Для цитирования: Контарева В.Ю. Анализ производственного травматизма в сельскохозяйственной отрасли / В.Ю. Контарева, С.Н. Белик // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 12. – № 4(64). – С. 250-258. – EDN: DUGIRB.

Введение. Производственный травматизм является серьёзной социально-медицинской и социально-экономической проблемой, так как является причиной значительного количества числа дней временной нетрудоспособности, а также стойкой утраты профессиональной и общей трудоспособности, сопровождающейся значительным снижением здоровья и инвалидизацией. По данным ряда исследований производственный травматизм является основной причиной смерти работников в возрасте до 37 лет и находится на третьем месте в общей численности населения [1]. Общие медицинские и косвенные издержки, связанные с производственными травмами и заболеваниями находятся на одном уровне с затратами на онкологические заболевания и превышают таковые при диабете, ишемической болезни сердца, инсульте и

ХОБЛ. Но при этом не получают такого же научного, медицинского или общественного внимания [2].

Экономические потери вследствие профессиональной заболеваемости и производственного травматизма составляют ежегодно миллиарды рублей и оцениваются разными источниками в размере от 2 до 5% ВВП [3]. Современная статистика [4] свидетельствует об общем снижении численности пострадавших в результате несчастных случаев на производстве за период с 2018 по 2022 годы (рис. 1), проблема травматизма, включая летальные исходы, стоит остро как в нашей стране, так и за рубежом. Несмотря на положительную динамику в рассматриваемом вопросе остаются проблемы, требующие детального изучения и быстрого реагирования как со стороны работодателей, так и государства.

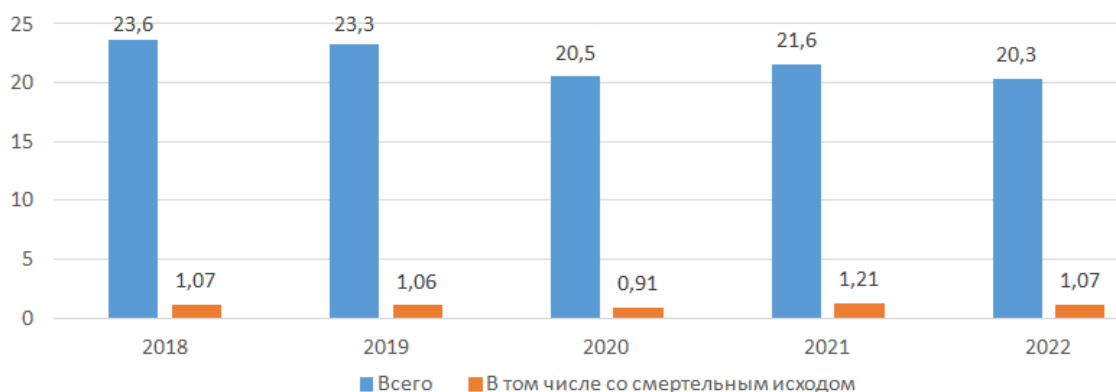


Рисунок 1 – Количество пострадавших на производстве, в том числе со смертельным исходом с 2011 по 2022 гг., тыс.чел.(составлено авторами)

Во всех сферах экономической и производственной деятельности происходят несчастные случаи различных видов (связанные с трудовой деятельностью, с производством и не связанные) в следствии технических, технологических, экономических, организационных и других групп причин (рис. 2). В случае рассмотрения ситуации по травматизму в разрезе основных

видов деятельности по количеству несчастных случаев лидируют такие хозяйственные субъекты как фабрики, заводы и подобные предприятия, использующие в производственных процессах подъемно-транспортное оборудование, силовые рабочие машины (так называемые обрабатывающие производства); организации, осуществляющие перевозку грузов и пассажиров, а также соп-

ряженную с ней деятельность (например, обработку и хранение грузов); предприятия, использующие природные ресурсы животного и растительного происхождения, в том числе выращивание зер-

новых, содержание и разведение животных, а также получающие древесину, растения, животных, продукты животного происхождения (так называемое, сельское хозяйство).

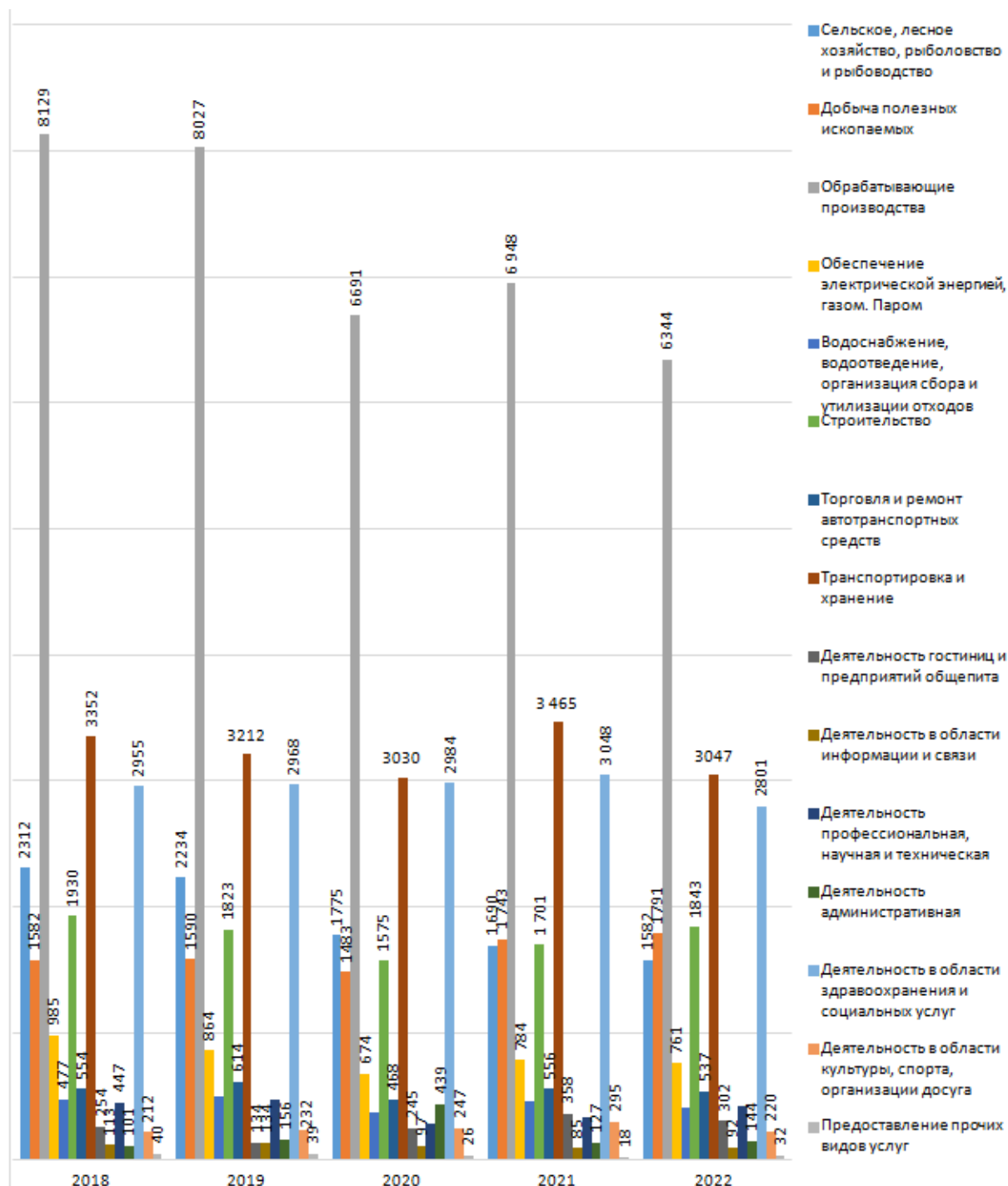


Рисунок 2 – Сведения по производственному травматизму по основным видам деятельности за 2018-2022 годы (человек) (составлено авторами)

Методология. Эмпирической базой исследования явились сведения Федеральной службы государственной статистики и опубликованные труды зарубежных и отечественных исследователей относительно состояния производственного травматизма и его причин в сельскохозяйственной

отрасли. Теоретические исследования проводились путем изучения, анализа и обобщения данных эмпирической базы.

Результаты. Следует отметить, что наиболее травмоопасным сектором сельского хозяйства в течении периода наблюдений с 2018 по 2022 гг

является сектор животноводства. В среднем в 2,5-3 раза менее опасен сектор растениеводства в области выращивания однолетних культур. Наиме-

нее травмоопасны сектора смешанного сельского хозяйства, вспомогательной деятельности и выращивания многолетних культур.

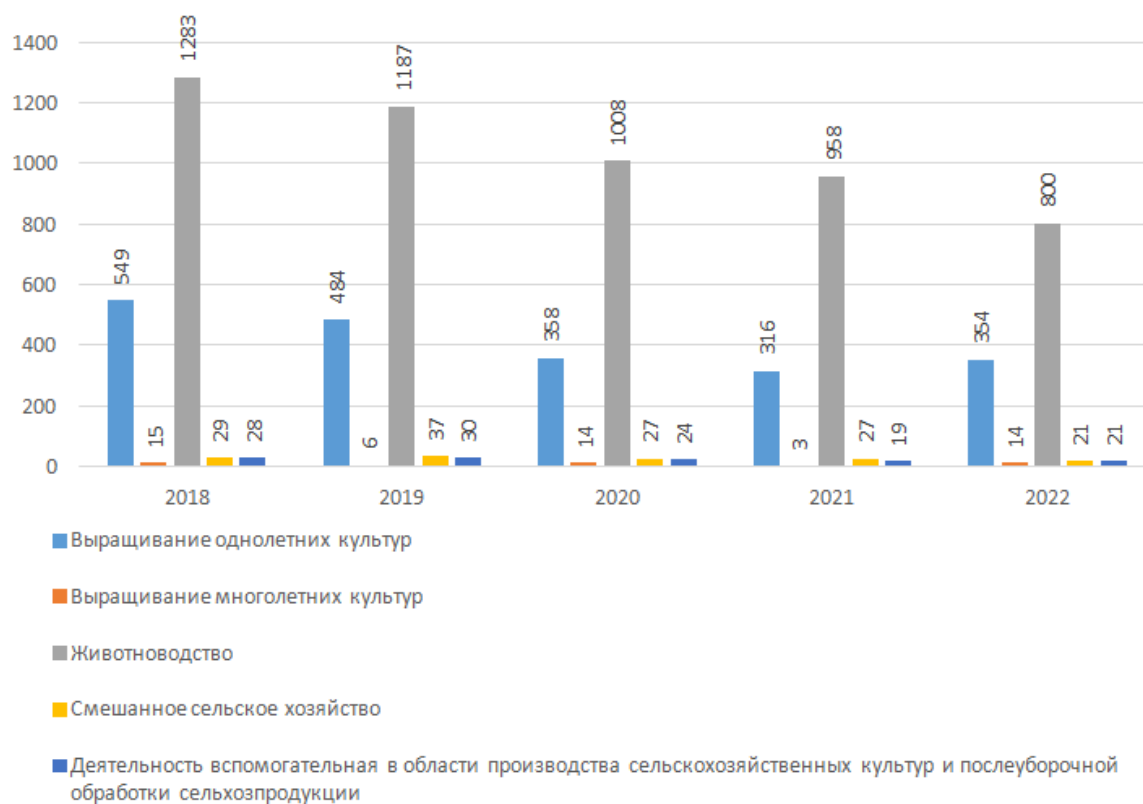


Рисунок 3 – Сведения по производственному травматизму в основных отраслях сельского хозяйства за 2018-2022 годы (человек) (составлено авторами)

Статистические данные (табл. 1) свидетельствуют о тенденции к снижению как численности предприятий сельхозотрасли в целом, так и к снижению численности сотрудников, занятых на данных предприятиях. Также отмечается рост затрат на мероприятия по охране труда, что ведёт к снижению общего числа пострадавших. Рассмотрим для примера сектора животноводства и выращивания однолетних культур. В первом случае за пятилетний период количество предприятий снизилось с 4376 до 3423 (на 953 или на 22%), уменьшилось и общее число сотрудников с 537957 человек до 476102 человек (на 61855 человек или на 12%), увеличились расходы на мероприятия по охране труда 6,808 тыс. рублей до 12,956 тыс. рублей на одного работника (на 6,148 тыс. рублей или 2,1 раза) и, как следствие, сократилось общее число зафиксированных несчастных случаев с 1283 до 800 случаев (на 483 случая или на 37,6%). Во втором случае ситуация аналогичная: количество предприятий уменьшилось с 4554 до 3748 (на 806 или на 17,7%), число сотрудников с 381014 до 337524 (на 43490 или на 11,4%), затраты на мероприятия по охране труда возросли с 5,322 тыс. рублей до 9,676 тыс. рублей на одного человека (на 4,354 тыс. рублей или в 1,8 раз) и, как следствие, количество несчастных случаев понизилось с 549 до 354 (на 195 или 35,5%).

Увеличение затрат на мероприятия по охране труда (которые включают приобретение средств индивидуальной защиты, организационные, технические, технологические, санитарно-гигиенические мероприятия, обучение работников по охране труда, проведение специальной оценки условий труда, медицинские осмотры) подразумевает улучшение условий труда в рассматриваемой отрасли, а следовательно, снижение травматизма на предприятиях, в организациях.

Снижение занятых в сельхозотрасли можно рассматривать как с положительной стороны, когда технический и технологический прогресс способствуют повышению уровней механизации и автоматизации отрасли, а следовательно повышению производительности труда, так и с отрицательной стороны, когда в результате неоформленных трудовых отношений несчастные случаи и травмы не фиксируются как производственные [5].

Следует отметить, что рассматриваемые данные Федеральной службы государственной статистики не учитывают недостатки предоставления статистических данных, в том числе нарушения сроков их предоставления, недостоверность или фактов замалчивания о несчастных случаях организациями по разнообразным причинам:

– зависимое положение объема страхового тарифа предприятий и возвращение средств из фонда социального страхования на профилактику производственного травматизма от численного состава увечий и летальных исходов несчастных случаев;

– наложение штрафов надзорными и контролирующими органами (так при тяжелом и смертельном случае включенный в комиссию по расследованию инспектор Государственной инспек-

ции труда вправе предписывать штрафы за выявленные нарушения и устанавливать необходимость их устранения, что несет за собой, как правило, непредусмотренные расходы для собственника);

– уклонение должностных лиц от ответственности, включая уголовную (например, по ст. 143 УК РФ «Нарушение требований охраны труда»);

– временные, материальные затраты и сбор немалого объема документов при расследовании несчастных случаев и т.д.

Таблица 1 – Сводные данные по производственному травматизму в сельском хозяйстве за 2018-2022 гг. (составлено автором по данным Федеральной службы государственной статистики)

Период	Число предприятий	Средняя численность работников, чел			Число пострадавших / в ч.т. со смертельным исходом, чел.			Расходы на мероприятия по охране труда, тыс. руб.	
		всего	женщин	мужчин	всего	женщин	мужчин	всего	на 1 чел
Выращивание однолетних культур									
2018	4554	381014	117197	263817	549/38	134/1	415/37	2027678,5	5,322
2019	4504	393061	114641	278420	484/50	123/6	361/44	2359614,9	6,003
2020	4 407	360021	112 202	247 819	358/35	95/0	263/35	2407158,3	6,686
2021	3 857	330497	100 371	230 126	316/28	82/4	234/24	2722129,8	8,236
2022	3748	337524	101864	235660	354/49	76/3	278/46	3265992,4	9,676
Выращивание многолетних культур									
2018	246	19293	7676	11617	15/1	5/0	10/1	222341,8	11,524
2019	268	18262	7290	10972	6/1	4/0	2/1	92294,9	5,054
2020	260	20101	7752	12349	14/1	3/0	11/1	255421,1	12,707
2021	209	18569	6740	11829	3/3	0/0	3/3	209988,2	5,322
2022	202	20515	7098	13417	14/3	2/1	12/2	230645,9	11,243
Животноводство									
2018	4376	537957	222156	315801	1283/65	472/7	811/58	3662339,6	6,808
2019	4399	535664	217129	318535	1187/49	454/1	733/48	4316569,7	8,058
2020	4086	503775	200221	303554	1008/44	349/3	659/41	5037511,7	10,000
2021	3541	476978	191647	285331	958/60	343/4	615/56	5995030,1	12,569
2022	3423	476102	190809	285293	800/48	281/5	519/43	6168544,3	12,956
Смешанное сельское хозяйство									
2018	617	26623	8980	17643	29/2	5/0	24/2	72807	2,735
2019	650	26468	8871	17597	37/1	12/0	25/1	175981,3	6,649
2020	617	25678	8964	16 714	27/3	7/1	20/2	104497,7	4,070
2021	484	27119	9886	17 233	27/5	11/1	16/4	155341,2	5,728
2022	387	20744	6443	14301	21/1	4/0	17/1	188716,6	11,524
Деятельность вспомогательная в области производства сельскохозяйственных культур и послеуборочной обработки сельхозпродукции									
2018	1355	47705	19218	28487	28/2	8/1	20/1	173408,6	3,635
2019	1395	45393	18411	26982	30/2	4/0	26/2	186310,5	2,735
2020	1 345	40171	16511	23660	24/2	5/0	19/2	217910,8	5,425
2021	1 376	39235	15989	23246	19/4	3/0	16/4	188250,6	4,798
2022	1355	39923	15902	24021	21/3	6/0	15/3	256521,1	6,425

Необходимо подчеркнуть, что аналитика данных по производственному травматизму ведется без учета малых и микропредприятий, так как Росстат таких данных не публикует, в этой связи имеется неохваченный сегмент предприятий с возможными случаями травматизма.

Таким образом, ситуация с производственным травматизмом двойственна: с одной стороны

отмечена положительная динамика по снижению производственного травматизма в сельхозотрасли, с другой – не учтен ряд факторов, влияющих на данную ситуацию.

Рассмотрим некоторые виды травм и особенности их возникновения. Основными источниками травм в сельском хозяйстве являются крупный рогатый скот, сельхозтехника и машины, ручные

инструменты [6,7,8].

По большей части травмирование в растениеводстве возникает при сборе урожая, обработке почвы, ремонте и обслуживании механизмов, машин и техники, посевах и посадке сельскохозяйственных культур, разгрузочно-погрузочных работах, послеуборочной обработке урожая и т.д.

Около трети травм в сельском хозяйстве приходится на верхние конечности [9], поскольку они в основном задействованы при вождении машин или использовании инструментов. Наиболее частыми типами повреждений являются открытые раны, рваные раны, переломы, растяжения и повреждения от перенапряжения.

Широко распространены травмы глаз [10]. Использование щелочей, кислот, извести – наиболее частая причина травм глаз и самой распространенная причина всех химических ожогов глаз в сельском хозяйстве. Бодание коровы рогом является причиной травм глаз на молочном производстве; 50% из них являются проникающими ранениями глаза. При ремонтных работах сельхозтехники и машин распространены удары глаз ручным инструментом, например молотком.

Наиболее распространенными травмами среди операторов сельскохозяйственной техники являются застревание в результате соскальзывания стартовой рукоятки, порезы или колющие удары острыми предметами, удары падающими предметами и падение с неподвижных транспортных средств [11].

Наиболее типичными несчастными случаями с летальным исходом в сельском хозяйстве являются случаи связанные с тракторами, в том числе с опрокидыванием трактора во время движения по дороге или работы в поле, или наезда трактором на пострадавших [12]. На животноводческих предприятиях основными причинами смертельных несчастных случаев являются удары рогами, копытами или раздавливания скотом [13]. При погрузке – разгрузке животных в транспортные средства, очистке канализационных колодцев и жижеборников [14].

Многомерный логистический регрессионный анализ зарубежных исследователей свидетельствует

о том, что риск травматизма в сельском хозяйстве увеличивается с возрастом [8, 11, 13]. Возрастная структура работников сельского хозяйства без учета пола выглядит следующим образом: 28% приходится на возраст 50-59 лет, 24 % – 40-49 лет, 22% – 30-39 лет [15]. Молодые же специалисты, имеющие образование по специальностям сельскохозяйственной направленности трудоустраиваются в других отраслях [5]. По прогнозам специалистов Высшей Школы Экономики, в каждую последующую пятилетку в нашей стране будет отмечен рост модального значения среднего возраста экономически активного населения примерно на 5 лет. Таким образом к 2030 г. самой большой по количеству группой будут работники в возрастном диапазоне 41–45 лет, что может повлечь за собой и увеличение производственного травматизма [3].

Источниками первоначальных травматизма на предприятиях различных видов деятельности, среди которых и сельскохозяйственные, служит неготовность собственников продвигать, улучшать и модернизировать систему охраны труда, формировать службы по охране труда с необходимым штатом специалистов, пожарной, производственной безопасности, координировать систематический ступенчатый контроль за выполнением законодательства в сфере охраны труда, за реализацией направлений по улучшению условий и охране труда, за безопасноориентированным поведением, а также соблюдением принципов и требований охраны труда с позиции персонала [16].

В качестве первоначальных травматизма следует отметить состояние условий труда в сельском хозяйстве, где более 1/3 численности работников за наблюдаемый период 2018-2022 гг (рис.4) осуществляют свои трудовые функции в условиях не отвечающих требованиям нормативно-правовой документации, т.е. во вредных и опасных условиях под воздействием факторов производственной среды и трудового процесса (рис.5), в силу воздействия которых имеют место быть «человеческий фактор» и «проявленная неосторожность», как основная причина несчастного случая.

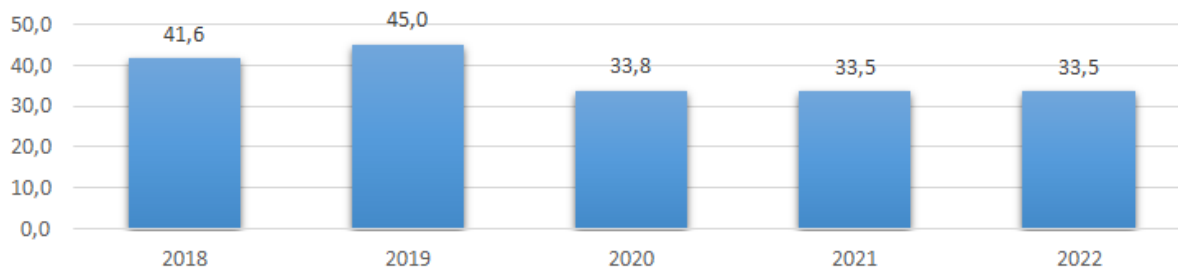


Рисунок 4 – Доля численности работников, занятых на работах с вредными и (или) опасными условиями труда в сельском хозяйстве (в %) в 2018-2022 годах (составлено авторами)

В соответствии с исследованиями ряда как отечественных, так и зарубежных авторов [9,16,17], основными причинами травматизма в сельском

хозяйстве являются:

- многообразие видов работ и сезонность;
- человеческий фактор, проявленная неос-

торожность, опасные действия работников;

- неправильное использование защитных устройств и отсутствие конструкции безопасности в инструментах;
- неправильная эксплуатация, износ и неисправность оборудования, ручных инструментов, машин с приводом, молотилок, опрыскивателей, дробилок, зерновых шнеков и т.д.;
- недостатки в производстве и контроле за машинами, используемыми в полевых условиях;
- плохая оснащённость рабочих мест, содержание их в ненадлежащем состоянии;
- организация рабочего производства не отвечающая условиям безопасности;

- дефицит контроля со стороны должностного лица за трудовой дисциплиной, реализацией технологического процесса и достаточной подготовкой по охране труда;
- низкий показатель финансирования процедур направленных на улучшение условий трудовой деятельности и безопасность реализации трудовых функций;
- невосприимчивость к внедрению актуальных достижений трудоохранной науки;
- условия труда несоответствующие трудовому законодательству, наличие вредных и опасных факторов;
- ряд других.

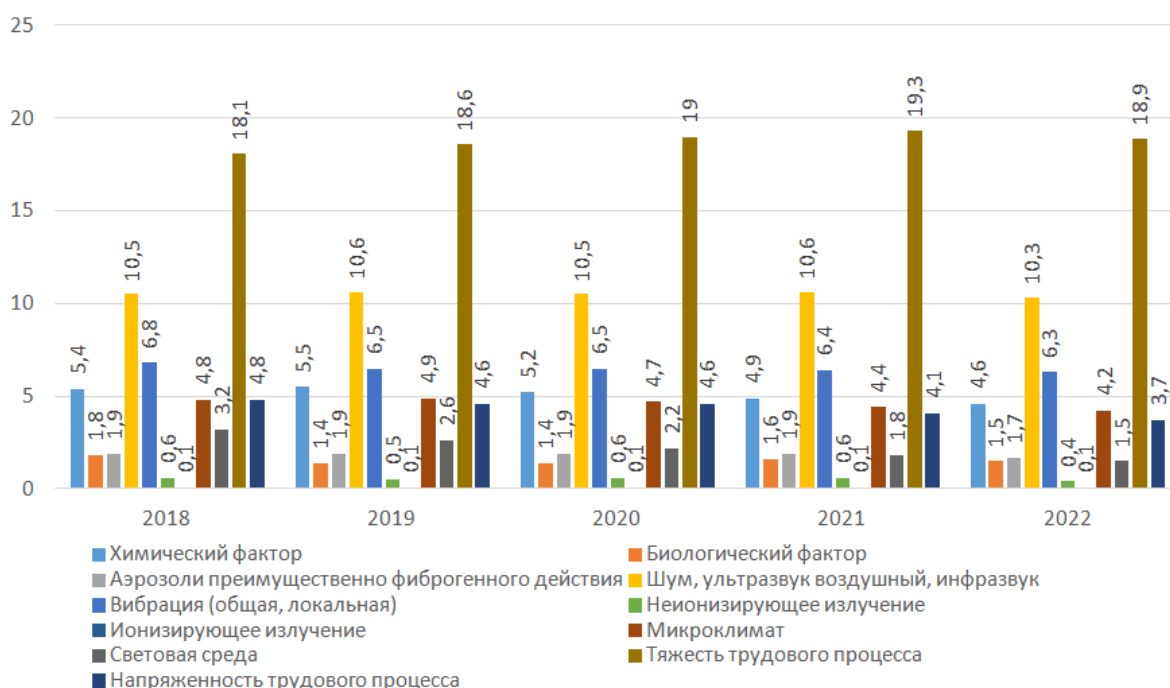


Рисунок 5 – Доля численности работников, занятых на работах с опасными и вредными факторами производственной среды и трудового процесса в сельском хозяйстве (в %) в 2018-2022 годах (составлено авторами)

Мероприятия по профилактике и снижению травматизма:

- разработка совокупности технических, организационных и санитарно-гигиенических мероприятий, имеющих задачу – предупреждение травматизма;
- финансовое стимулирование направленное на снижения уровня травматизма [18];
- реализация системы передовой практики для повышения осведомленности работников об источниках риска, выявления наиболее опасных ситуаций, вытекающих из особенностей производственной среды и организации трудового процесса, а также применения организационных поведенческих и предупредительных мер [9];
- организация служб первичной медико-санитарной помощи на предприятиях, лечебно-профилактическое сопровождение трудового стажа и обучение методам и приемам по оказанию первой

помощи пострадавшим [17,19];

- покупка и применение средств индивидуальной защиты;
- стабилизация функционирования и увеличения эффективности средств коллективной защиты;
- формирование законодательных мер безопасности в отношении сельскохозяйственной техники и машин, специальных водительских прав и регулярных проверок сельскохозяйственной техники [8];
- профессиональный отбор с позиции пригодности, в том числе возрастной, с учетом специфики производственной деятельности;
- гарантирование безопасности производственного комплекса предприятия путем поддержания его составляющих в исправном состоянии посредством ремонта, замены и т. д. [19];
- прагматизация режимов труда и отдыха;
- улучшение условий труда;

– ряд других.

Обсуждение. Изучение и анализ производственного травматизма и его причин в сельскохозяйственной отрасли показали, что данная отрасль признана одной из наиболее опасных как в нашей стране, так и за рубежом [20]. В сельском хозяйстве задействована значительная часть работоспособного населения страны, а несчастные случаи приводят к долгосрочным последствиям для сельскохозяйственных предприятий в результате рабочих и экономических потерь [9,19]. Причины производственного травматизма многочисленны и зависят от многих факторов: пола, возраста, стажа работы, квалификации, мотивации, вида работы и способа выполнения работы, организации, условий труда, социально-экономических факторов и других [1]. Наиболее травмоопасным сектором сельского хозяйства в течении периода наблюдений с 2018 по 2022 гг является животноводство [13]. Рост травматизма обусловлен значительной индустриализацией животноводства, в результате которой возросла интенсивность контактов работников с животными, поскольку промышленные фермы могут содержать десятки тысяч животных [21].

В целях повышения оперативности и эффективности принимаемых мер по организации и проведению расследования и локализации причин групповых несчастных случаев, а также несчастных случаев с тяжелыми последствиями и проведения анализа состояния и причин производственного травматизма приказом Росстата от 01.07.2022 N 485 были утверждены формы отчетности, содержащие оперативные данные о происшедших групповых, тяжелых и смертельных несчастных случаях и пострадавших со смертельным исходом, а также сведения о причинах несчастных случаев, сведения о видах несчастных случаев с тяжелыми последствиями [22].

Выводы. В связи с вышеизложенным надзор за производственным травматизмом в сельском хозяйстве необходим для информирования заинтересованных сторон об опасностях и рисках на рабочем месте с целью совершенствования и продвижения политики и практики профилактики травматизма в этой опасной отрасли. В настоящее время статистикой не учитываются нарушения порядка предоставления статистических данных, их несвоевременность, недостоверность или полное сокрытие несчастных случаев предприятиями в силу высокой финансовой затратности для собственников. Кроме этого в статистике не ведется учет малых и микропредприятий, а следовательно, не учитываются и случаи производственного травматизма на них. Поэтому необходим дополнительный сбор данных с более широким охватом, которые дополняют информацию о текущем состоянии производственного травматизма в сельском хозяйстве и позволяют разработать адекватные и эффективные меры профилактики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Cemalovic N, Rosic S, Toromanovic N. Analysis of the causes of occupational injuries and application of preventive measures // *Mater Sociomed*. 2016 Feb;28(1):51-2. doi: 10.5455/msm.2016.28.51-52. Epub 2016 Jan 30. PMID: 27047268; PMCID: PMC4789624.
2. Leigh JP. Economic burden of occupational injury and illness in the United States // *Milbank Q*. 2011 Dec;89(4):728-72. doi: 10.1111/j.1468-0009.2011.00648.x. PMID: 22188353; PMCID: PMC3250639.
3. Лебедева-Несевря Н.А., Костарев В.Г., Никифорова Н.В., Цинкер М.Ю. Заболеваемость с временной утратой трудоспособности работающего населения: федеральные и региональные показатели и тенденции 2005–2014 гг. // *Гигиена и санитария*. 2017; 96(11): 1054-1059. DOI: <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-11-1054-1059>
4. Условия труда, производственный травматизм (по отдельным видам экономической деятельности) // Федеральная служба государственной статистики. URL: http://rosstat.gov.ru/working_conditions
5. Попов С.В., Щеняев В.И. О проблемах безопасности труда в сельскохозяйственном секторе экономики на современном этапе развития отрасли // *Вестник аграрной науки Дона*, 2021. №3. С.76-84.
6. Johnson A, Vaccagnini L, Haynatzki GR, Achutan C, Loomis D, Rautiainen RH. Agricultural Injuries among Farmers and Ranchers in the Central United States during 2011-2015 // *J Agromedicine*. 2021 Jan;26(1):62-72. doi: 10.1080/1059924X.2020.1845268. Epub 2021 Jan 18. PMID: 33131463
7. Angioloni S, Jack C. Farm fatalities in Northern Ireland agriculture: What fifty years of data tell us. // *Econ Hum Biol*. 2022 Aug;46:101122. doi: 10.1016/j.ehb.2022.101122. Epub 2022 Mar 10.
8. Kim K, Kim H, Lee M, Jung W, Choi D. Incidence Rates of Agricultural Machine-Related Injuries in South Korea // *Int J Environ Res Public Health*. 2022 Nov 24;19(23):15588. doi: 10.3390/ijerph192315588.
9. Mucci N, Traversini V, Lulli LG, Baldassarre A, Galea RP, Arcangeli G. Upper Limb's Injuries in Agriculture: A Systematic Review // *Int J Environ Res Public Health*. 2020 Jun 23;17(12):4501. doi: 10.3390/ijerph17124501.
10. Агаева Р.Б. Распространенность травм органа зрения среди населения Азербайджанской Республики // *Вестник офтальмологии*, №5. 2015. С.54-60. doi: 10.17116/ofal-ma2015131554-60
11. Zheng L, Zhao N, Chen D, Hu M, Fu X, Stallones L, Xiang H, Wang Z. Nonfatal work-related injuries among agricultural machinery operators in northern China: a cross-sectional study // *Injury*. 2014 Mar;45(3):599-604. doi: 10.1016/j.injury.2013.07.004. Epub 2013 Jul 31.
12. Rautiainen R.H, Reynolds S.J. Mortality and morbidity in agriculture in the United States // *J Agric Saf Health*. 2002 Aug;8(3):259-76. doi: 10.13031/2013.9054.
13. Mohammadrezaei M, Meredith D, McNamara J. Beyond Age and Cause: A Multidimensional Characterization of Fatal Farm Injuries in Ireland // *J Agromedicine*. 2023 Apr;28(2):277-287. doi: 10.1080/1059924X.2022.2116138. Epub 2022 Aug 27.
14. Шкрабак Р.В. Теоретико-практические проблемы безопасности труда и инновационные пути их решения в механизированном агропромышленном производстве // *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. – 2023. – С.121-131.
15. Бахматова Г.А. Значение диверсификации для повышения занятости сельского населения // *Никоновские чтения*, 2020. – С.118-122.
16. Контарева В.Ю. Анализ производственного травматизма на предприятиях по переработке и консервированию мяса и мясной пищевой продукции // *Безопасность техногенных и природных систем*. – 2021. – № 4. – С. 8-13. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2021-4-8-13>
17. Nag PK, Nag A. Drudgery, accidents and injuries in Indian agriculture // *Ind Health*. 2004 Apr;42(2):149-62. doi: 10.2486/indhealth.42.149.
18. Lehtola MM, Rautiainen RH, Day LM, Schonstein E, Suutarinen J, Salminen S, Verbeek JH. Effectiveness of interventions in preventing injuries in agriculture a systematic review and meta-analysis // *Scand J Work Environ Health*. 2008 Oct;34(5):327-

36. doi: 10.5271/sjweh.1279. Epub 2008 Oct 14.

19. Контарева В.Ю. Профессиональная заболеваемость женщин, связанная с условиями труда в сельском хозяйстве. Безопасность техногенных и природных систем. 2023;7(3):24-33. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-3-24-33>

20. Tsai WT. Survey on Agricultural Accidents or Injuries in Taiwan // J Agromedicine. 2021 Oct;26(4):404-410. doi: 10.1080/1059924X.2020.1845895. Epub 2021 Jan 18. PMID: 33131422

21. Dignard C, Leibler JH. Recent Research on Occupational Animal Exposures and Health Risks: A Narrative Review // Curr Environ Health Rep. 2019 Dec;6(4):236-246. doi: 10.1007/s40572-019-00253-5. PMID: 31823248; PMCID: PMC7099379.

22. Об утверждении форм федерального статистического наблюдения для организации федерального статистического наблюдения за травматизмом на производстве и профессиональными заболеваниями // Приказ/от 1 июля 2022 г. N 485. Федеральная служба государственной статистики. – 2022 <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=426707&ysclid=lnrb9e972t627828064#h373>.

Статья поступила в редакцию 17.10.2023

Статья принята к публикации 15.12.2023

УДК 629.73; 574.21; 504.5

EDN: GHVSWN

**БИОМОНИТОРИНГ ХОДА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЭКОСИСТЕМ
МЕСТА АВИАЦИОННОГО ПРОИСШЕСТВИЯ**

© Автор(ы) 2023

SPIN: 1877-5016

AuthorID: 533402

ORCID: 0000-0001-9867-2208

ResearcherID: J-7176-2017

ScopusID: 6507352992

НИКОЛАЙКИН Николай Иванович, доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Безопасность полетов и жизнедеятельности»
Московский государственный технический университет гражданской авиации
(125493, Россия, Москва, Кронштадтский бул., 20, e-mail: nikols_n@mail.ru)

SPIN: 7266-1161

AuthorID: 687738

ORCID: 0000-0002-9746-0323

ScopusID: 6504419601

НИКОЛАЙКИНА Наталья Евгеньевна, кандидат технических наук, доцент,
профессор кафедры «ХимБиотех»
Московский политехнический университет
(107023, Москва, ул. Большая Семёновская, 38, e-mail: nikols_153@mail.ru)

SPIN: 5882-5079

AuthorID: 730133

ORCID: 0000-0003-0380-2714

СТАРКОВ Евгений Юрьевич, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Безопасность полетов и жизнедеятельности»
Московский государственный технический университет гражданской авиации
(125493, Россия, Москва, Кронштадтский бул., 20, e-mail: starkoff89@mail.ru)

Аннотация. Рассматривается проблема контроля процесса восстановления нарушенных экологических систем на территориях мест авиационных происшествий. Приведены результаты анализа экологических последствий загрязнения таких территорий. Констатируется, что происходит единовременное многоплановое негативное экологическое воздействие в виде аварийно-залпового внешнего давления, как на биоценоз, так и на биотоп экосистемы с образованием экстремальной геотехнической системы. Складывающаяся ситуация сравнивается с происходящим на территориях неорганизованных свалок отходов. Загрязняющие вещества оказывают значительное токсическое действие на компоненты почвы, вступают в перекрестные химические реакции. Отмечается, что возможен синтез ещё более агрессивных соединений. Констатируется наличие дополнительных экологических издержек от процедур поиска и спасания на территории места авиационного происшествия, а также от задержек и отмен рейсов, связанных с таким событием. Анализируются штатные требования к проведению природовосстановительных работ после завершения расследования причин авиационного происшествия, а также современные предложения по их совершенствованию. В аварийнонарушенных местах самое длительное время сохраняется загрязнение почв, поэтому констатировать возможность прекращения реанимационной деятельности, следует по результатам анализов суммарной токсичности почвенного покрова. Среди современных методов мониторинга техногенной загрязнённости экологических систем в рассматриваемом случае выделяются биологические методы, так как они показывают результаты суммарного воздействия разнообразных факторов прямо на живые организмы. Предлагается использовать методы биотестирования. Цель работы - подтвердить пригодность и результативность таких методов для мониторинга изменения общей загрязнённости места авиационного происшествия. Приведены результаты экспериментальной проверки возможности выявления общей токсичности техногенно нарушаемых почв. В качестве тест-объектов для эксперимента в данном исследовании используются почвы газонов и зеленых насаждений в промзоне рядом с теплоэлектроцентралью, крупной автомагистралью и в зоне фонового воздействия мегаполиса. Анализировалась интегральная токсичность и её зависимость от времени года (в летний и осенний периоды). Лабораторные измерения токсичности комплексно загрязнённой почвы проведены с использованием биоллюминесцирующих штаммов микроорганизмов. Результаты представлены в виде диаграмм токсичности почв в весенний и осенний период на контрольной территории по семии точкам отбора проб. По результатам исследования рекомендуется биомониторинг проводить после очистки территории и рекультивации почвы в ходе последующего сукцессионного восстановления. Для оценки экологического состояния почвы территории, восстановленной после падения аварийного воздушного судна, следует применять биотестирование с использованием штаммов *Vibrio aquamarinus* и *Escherichia coli*. Результаты исследования рекомендуются использовать для организации проведения контроля хода восстанов-

ления экологических систем, нарушенных в экстремальных аварийных и катастрофических случаях на всех видах транспорта, а также в прочих отраслях экономики.

Ключевые слова: воздушное судно, авиационные происшествия, экосистема, биомониторинг, биотестирование почвы, биолюминесцентные микроорганизмы.

BIOMONITORING OF THE OF AVIATION INCIDENT PLACE ECOSYSTEMS RESTORATION COURSE

© The Author(s) 2023

NIKOLAYKIN Nikolay Ivanovich, doctor of technical sciences, professor,
professor of «Flight and life safety» department

Moscow State Technical University of Civil Aviation (MSTU CA)

(125493, Russia, Moscow, Kronshtadtsky Boulevard., 20, e-mail: nikols_n@mail.ru)

NIKOLAYKINA Natalia Evgenevna, candidate of technical sciences, associate professor,
professor of «ChemBioTech» department

Moscow Polytechnic University

(107023, Russia, Moscow, Bolshaya Semyonovskaya street, 38, e-mail: nikols_153@mail.ru)

STARKOV Evgenii Iurevich, candidate of technical sciences,
associate professor of «Flight and life safety» department»

Moscow State Technical University of Civil Aviation (MSTU CA)

(125493, Russia, Moscow, Kronshtadtsky Boulevard., 20, e-mail: starkoff89@mail.ru)

Abstract. The problem of the broken ecological systems restoration process control in the territory of the emergency aircraft falling is considered. Results of the environmental impacts pollution analysis at the territory of the plane falling place are given. It is noted that there is single multidimensional negative ecological impact, in the form of emergency and volley external pressure, both on a biocenosis, and on an ecosystem biotope that is forming an extreme geotechnical system. The developing situation is compared to the events in territories of waste unorganized dumps. Pollutants have considerable toxic effect on soil components, enter cross chemical reactions. It is noted that synthesis of even more aggressive connections is possible. Existence of additional ecological costs from search and rescue procedures in the event territory and also from flights delays and cancellations connected with the occurred incident is stated. Regular requirements to carrying out nature-restoring works after the end of the aviation incident causes investigation and also modern offers on their improvement are analyzed. In damaged places soils remains pollution the longest time. Therefore to state a possibility of the resuscitation activity termination, follows by results of analyses of a soil cover total toxicity. Among modern methods of ecological systems technogenic pollution monitoring biological methods are better. They show results of various factors total influence directly on living organisms. It is offered to use biotesting methods. The purpose of work is to confirm suitability and effectiveness of such methods for monitoring of the general pollution changing at the aviation incident place. Experimental check results of identification possibility of the general technogenically broken soils toxicity are given. As test objects for an experiment in this research were used lawns and green plantings soils in the industrial zone near combined heat and power plant, the large highway and in a zone of the megalopolis background influence. The integrated toxicity and its dependence on season was analyzed (during the summer and autumn periods). There were use the bioluminescing strains of microorganisms for the laboratory measurements of a complex polluted soil toxicity. Results are presented in the form of soils toxicity charts during the spring and autumn period in the control territory on seven sampling points. By results of a research it is recommended to carry out a biomonitoring after the territory cleaning and the soil recultivation during the subsequent suktsessionny restoration. It is necessary to apply biotesting with use of *Vibrio aquamarinus* and *Escherichia coli* strains to assessment of soils ecological condition of the territory restored after of the emergency aircraft falling. Results of a research are recommended to use for the monitoring procedure organization behind the course of restoration of the ecological systems broken in extreme emergency and catastrophic cases on all means of transport and also in other branches of economy.

Keywords: aircraft, aviation incidents, ecosystem, biomonitoring, soil biotesting, bioluminescent microorganisms.

Для цитирования: Николайкин Н.И. Биомониторинг хода восстановления экосистем места авиационного происшествия / Н.И. Николайкин, Н.Е. Николайкина, Е.Ю. Старков // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 12. – № 4(64). – С. 259-265. – EDN: GHVSWN.

Введение. Гражданская авиация играет всевозрастающую роль в перевозках пассажиров и грузов во всем мире. Авиаперевозки должны быть удобны, комфортны, надежны и неопасны. Тем не менее, уже более века имели место и продолжают происходить самые различные негативные авиационные события, с риском реализации которых всегда боролась

и продолжают ему противодействовать [1, 2]. Признано, что исключить их полностью невозможно. В среднем за последние 10 лет в РФ количество авиационных происшествий (АП) составляло 36-37, из них число катастроф находилось на уровне 18-19 в год [3].

Исключительно важны последствия АП: погиб-

шие и получившие травмы различной тяжести люди, падение репутации авиакомпании и ГА в целом и многое прочее [4]. При этом результаты воздействия на окружающую среду (ОС) отходят на второй план, при очевидном негативном влиянии аварийного воздушного судна (АВС) на экосистемы территории места падения, приводящем к локальным

критическим последствиям [5].

В процессе АП аварийного ВС на экосистемы соответствующей территории оказывается многоплановое воздействие, которое иллюстрируется схемой на рисунке 1. Самолет на месте АП создает экстремальную геотехническую систему 2-го уровня [6].

Классификация физико-химических и геотехнических систем, образующихся на месте АП

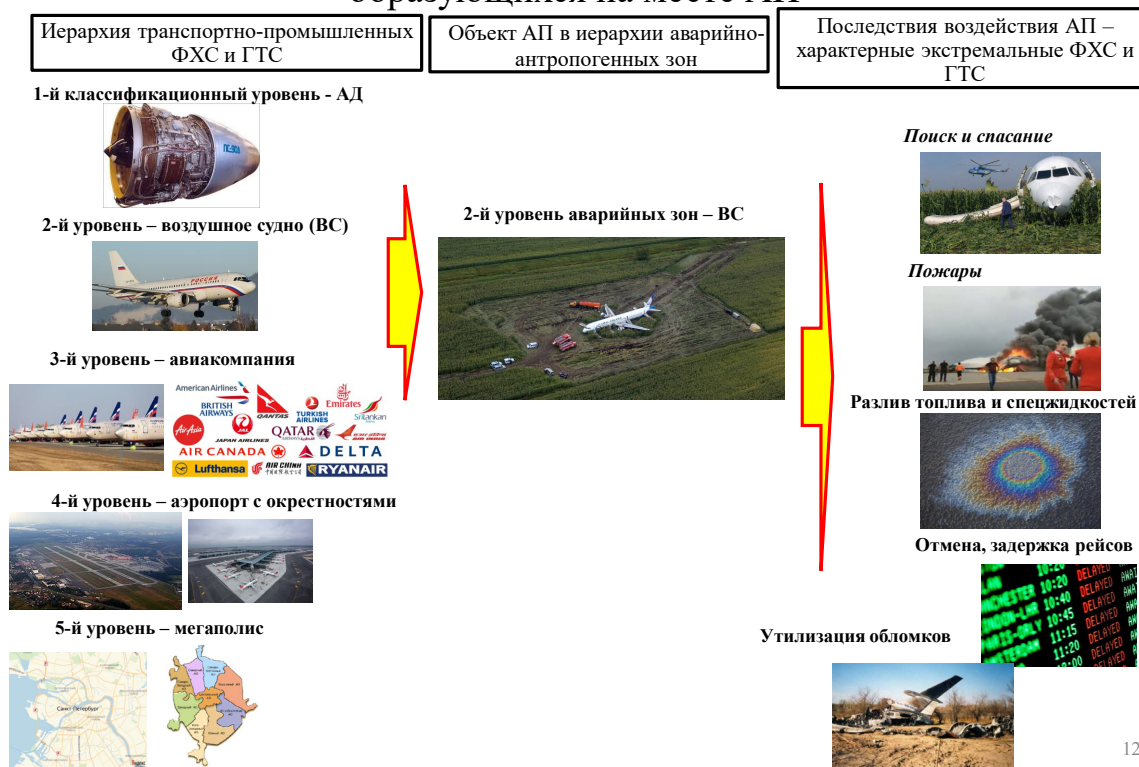


Рисунок 1 – Схема образования экстремальной аварийной геотехнической системы при АП с аварийным ВС в соответствии с классификацией физико-химических и геотехнических систем

В этой зоне разливаются горюче-смазочные материалы (ГСМ), в частности авиатопливо и разнообразные специальные жидкости, возникает множество обломков ВС и разрушенных на земле объектов [7, 8]. В почву экосистем попадают вещества из перевозимых грузов, багажа пассажиров и экипажа. Возникают пожары, которые тушат современными многокомпонентными жидкими и сыпучими составами. Загрязнение дополняется во время поиска и спасания, разнообразными механическими транспортными средствами, средствами механизации работ, тракторами [9]. Всё перечисленное воздействует на почву и природные водоемы, загрязняя их. Ситуация аналогична складывающейся на территориях неорганизованных свалок отходов, где загрязняющие вещества не только сами оказывают токсическое действие на компоненты почвы, но также вступают в перекрестные химические реакции синтеза ещё более агрессивных соединений. Дополнительное негативное воздействие на ОС происходит вследствие задержки и

отмены рейсов в аэропортах, организационно-технологически связанных с произошедшим АП.

Уровень суммарного ущерба ОС при характерном АП с АВС, произошедшем на землях разного назначения и на различных грунтах, достигает сотен миллионов рублей. Таковы расчетные данные в ценах 2018 года по методике расчета вреда, причинённого почве [10]. Предпринимаемые на месте АП природоохранные действия, регламентированные правилами расследования АП и инцидентов (так называемые ПРАПИ-98 [11]), безусловно, снижают негативные экологические последствия, однако не намного (оценочно до 10%).

В современной системе экологического мониторинга используются многочисленные методы, которые можно классифицировать на химические (в большей части титриметрические), физико-химические (хроматографические и электрохимические) и биологические (биоиндикация и биотестирование) [12]. Значительные преимущества принадлежат биологическим, ибо эти методы

показывают результаты как раздельного [13, 14], так и совместного [15-17] действия разнообразных факторов прямо на живые организмы. Биохимические методы успешно выявляют воздействие как химических, так и одновременно физических воздействий [18].

В настоящее время исследований экологических проблем, связанных с авиационными происшествиями, недостаточно. Однако схожими проблемами в иных отраслях экономики страны занимаются. Следует отметить работы авторов: Новиков С.В. [10], Татарин В.В. [10], Сарапульцева Е.И. [12, 14, 15], Ускалова Д.В., Устенко К.В. [15], Новиков В.К. [10], Мелехова О.П. [12] и др. При этом важно обратить внимание на авторов, занимающихся вопросами обеспечения безопасности полетов ВС, ибо предотвращение негативных авиационных событий исключает аварийные экологические последствия. Этому посвящены работы Гузий А.Г. [1], Шарова В.Д. [2], Воробьева В.В. [2], Грядунова К.И. [8, 9].

Методология. Целью работы являлось выявление пригодности и результативности биотестирования для определения текущего (фактического) экологического состояния хода восстановления почв затронутой территории, на которой ранее произошло АП, проведены работы по спасанию и расследованию обстоятельств АП, послужившее причиной комплексного поступления разнообразных загрязнений в почвы территории, а также был выполнен комплекс работ по сбору и утилизации привнесенных загрязнений, в том числе применялись методы очистки почвы. Взаимосвязь загрязнений атмосферы и почвы нарушенных территорий в результате антропогенного воздействия подтверждена экспериментально [19].

Для достижения цели проведена экспериментальная проверка возможности биомониторинга за параметрами интегральной токсичности образцов загрязненной почвы в разные периоды года.

В качестве места, эмитировавшего экосистему территории некоего чрезвычайного происшествия, при котором произошло комплексное загрязнение почвы разнообразными поллютантами была выбрана территория газонов в городской зоне, характеризующейся высокой степенью преобразованности за счет интенсивного техногенного воздействия. Большая часть почв под городскими зелеными насаждениями современных городов представлена индустриоземами и урбаноземами селитебной зоны.

Выбранная территория городской промзоны располагалась в сфере фонового воздействия соседнего мегаполиса. Ранее там наблюдался повышенный уровень загрязнения атмосферного воздуха отдельными газами (прежде всего бенз(а)пирен и диоксид азота).

Газоны находились рядом с большим энергетическим объектом (в санитарно-защитной зоне

городской теплоэлектростанции), вблизи нефтеперерабатывающего завода, рядом с крупной автомагистралью. Контролировались почвы на разных газонах всего в 7-ми точках. Расстояние между наиболее удаленными точками отбора проб – не более 5 км.

На территории выбранных газонов и зеленых насаждений коммунальными службами города в предыдущие годы в штатном режиме и планомерно проводились стандартные природоохранные мероприятия.

Лабораторные измерения параметров интегральной токсичности образцов почвы, комплексно загрязненной разнообразными загрязнениями проведены с использованием биолюминесцирующих штаммов *Photobacterium*, *Aliivibrio*, *Shewanella* и *Vibrio*, отбор проб в 7 точках по 100 г. с глубины 0 ... 150 мм согласно [20, 21]. Эталонными образцами «условно-чистой почвы» для контроля служили примеры почв охраняемой природной территории «Завидовского научно-опытного заповедника», имеющей статус национального парка и признанного ЮНЕСКО одним из самых экологически чистых мест.

Тест-объектами токсичности почв служили люминесцентные штаммы *Vibrio aquamarinus* DSM 26054 и генно-инженерные штаммы *Escherichia coli* с индуцируемым промотором. Измерялось снижение свечения тест-объектов за получасовую экспозицию.

Безразмерное значение индекса токсичности, определялось как $T = 100(I_k - I_o)/I_k$, где I_k и I_o , интенсивность биолюминесценции в контроле и опыте, соответственно. Оно использовалось в качестве количественного показателя тест-реакции. Согласно методике МР 01.019-07 [22] для биотеста «Эколюм» пороговые уровни интегральной индекса трактуются как: при $T \leq 20$: – допустимо; токсично при T от 20 и до 50; а также сильно токсично при $50 \leq T$.

Результаты исследований на наличие в почве генотоксичных веществ и поллютантов способных к нарушению синтеза белка получены на *SOS-lux* тесте. Оценка осуществлялась по фактору индукции F_i – отношение свечения клеток биосенсора с промотором *SOS-lux* штамм и с тестируемым составом и суспензии без токсикантов. Результаты оценки токсичности поллютантов в почве истолковываются как: $F_i < 2$ – эффект слабый; $2 \leq F_i \leq 10$ – средний; $F_i > 10$ – сильный эффект.

Результаты. Экспериментальная проверка токсичности проб почвы газонов показала, что после схода снега (весной) во всех точках уровень токсичности был в пределах допустимого значения (рис. 2). Это вполне может быть объяснено вымыванием накопленных поллютантов из почвенного покрова большим количеством талой воды.

В серии измерений, проведенных осенью того же года, установлено увеличение индекса

токсичности, относительно весенних данных, во всех точках, а также то, что в 5-ти точках из 7-ми, интегральный индекс токсичности уже превысил первый пороговый уровень ($T=20$) и пробы были идентифицированы по *MP* 01.019-07 как «токсичные». Выявленный рост интегральной токсичности был связан с очевидным дождевым вымыванием поллютантов из загрязненного воздуха и накоплением их в почве летом и в начале осени.

Кроме того, лабораторные опыты с использованием штамма *E.coli* (*pRecA-lux*), проведенные со всеми пробами (во всех 7 точках) позволили

установить (рис. 3), что присутствие в общей массе почвенных поллютанты мутагенов непосредственного действия, как в весеннее, так и осеннее время, сказывается на уровне геннотоксичности контролировавшихся почв «слабо эффективно» ($F_i < 2$) [23].

Анализы с помощью генно-модифицированного *Escherichia coli* с индуцированным промотором *pIbpA* на наличие веществ-плутантов, повреждающих клеточные белки, во всех отобранных образцах почвы, выявили (рис. 4) наличие таких веществ во всех образцах.

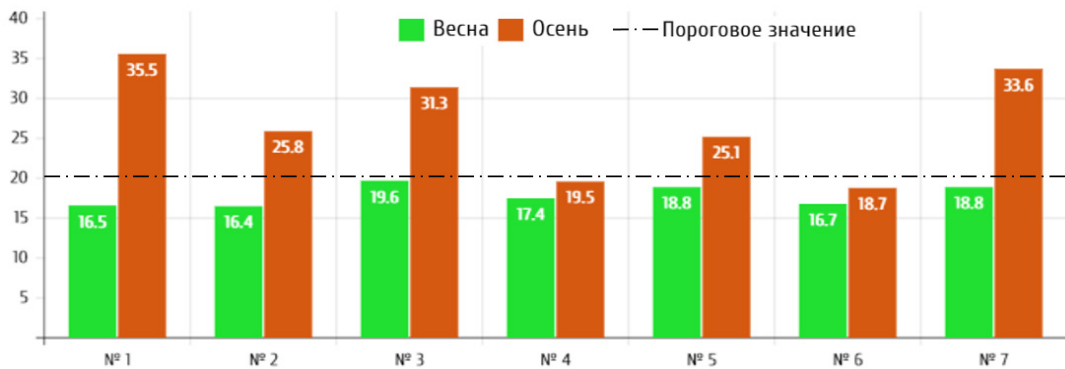


Рисунок 2 – Диаграмма токсичности почвы в весенний и осенний период в виде распределения интегрального индекса токсичности (*T*) на контрольной территории по точкам отбора проб

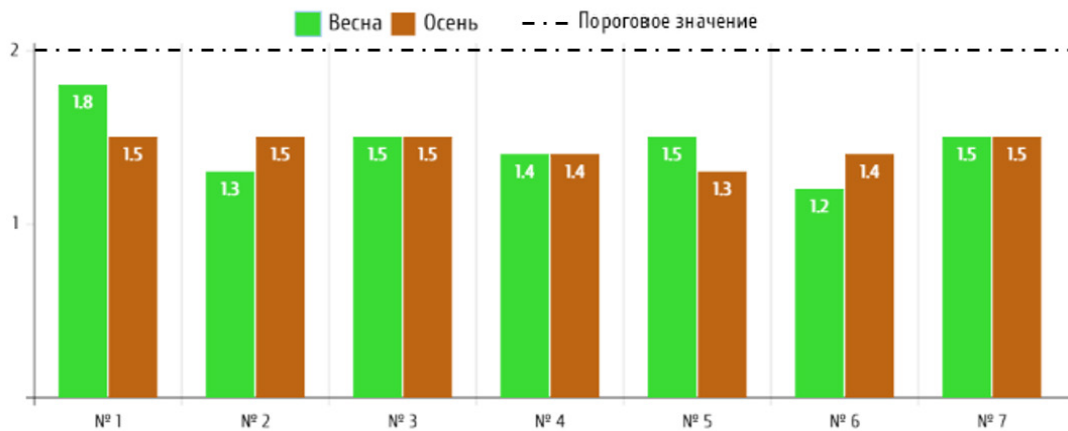


Рисунок 3 – Значения показателя генетической токсичности почв в контрольных точках территории зеленых насаждений в зоне техногенного воздействия

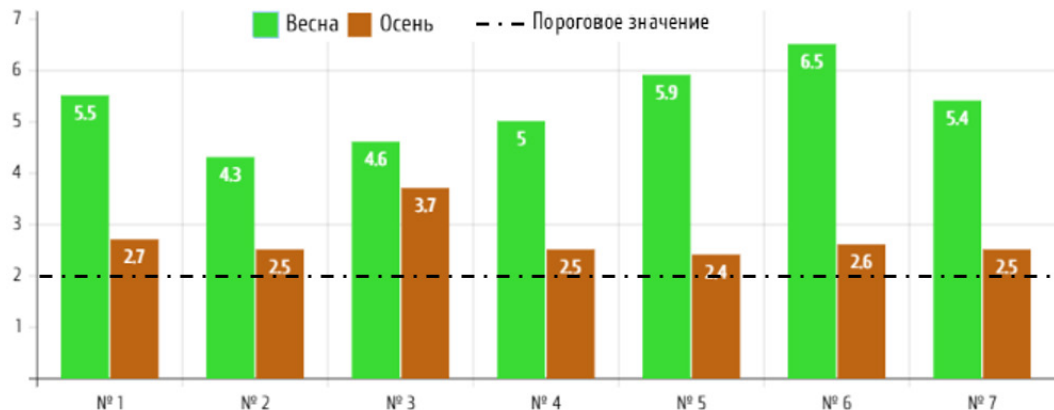


Рисунок 4 – Содержание почвенных поллютантов, угрожающих белкам клеток живых организмов, выраженное в виде величины фактора индукции (*F_i*), в контрольных точках

Весной их содержание (в частности, к таким поллютантам относятся без(α)пирен и формальдегид) значительно превышало осенние концентрации.

Обсуждение. Состояние нарушенных экосистем необходимо контролировать для своевременного принятия управленческих решений по продолжению природозащитных мероприятий либо, со временем, по изменению статуса использования таких территорий. Таким образом, по завершении работ на месте АП необходим контроль затронутой территории, то есть комплексный мониторинг изменения экологического состояния.

При аварийно-залповых воздействиях рассматриваемого типа загрязнение атмосферы (преимущественно от пожаров при АП) и поверхностных водоёмов снижается относительно быстро. Для антропогенно нарушенных территорий экспериментально подтверждена взаимосвязь загрязнений ат-

мосферы и почвы, загрязнение которой сохраняется наиболее длительное время [19]. Свидетельствовать о достижении положительного результата природовосстановительных действий на территории, нарушенной аварийным ВС, и констатировать возможность их прекращения, очевидно, следует по результатам анализов загрязнённости почвенного покрова.

В настоящее время количество документов, предписывающих процессуальные нормы мониторинга загрязнений атмосферы и гидросферы, достаточно велико, тогда как требований к состоянию антропогенно изменённых почв не достаточно.

Предлагаемая последовательность этапов работы по восстановлению природной стабильности процессов жизнедеятельности биоценозов нарушенных экосистем на территории места падения аварийного воздушного судна представлена на рисунке 5.

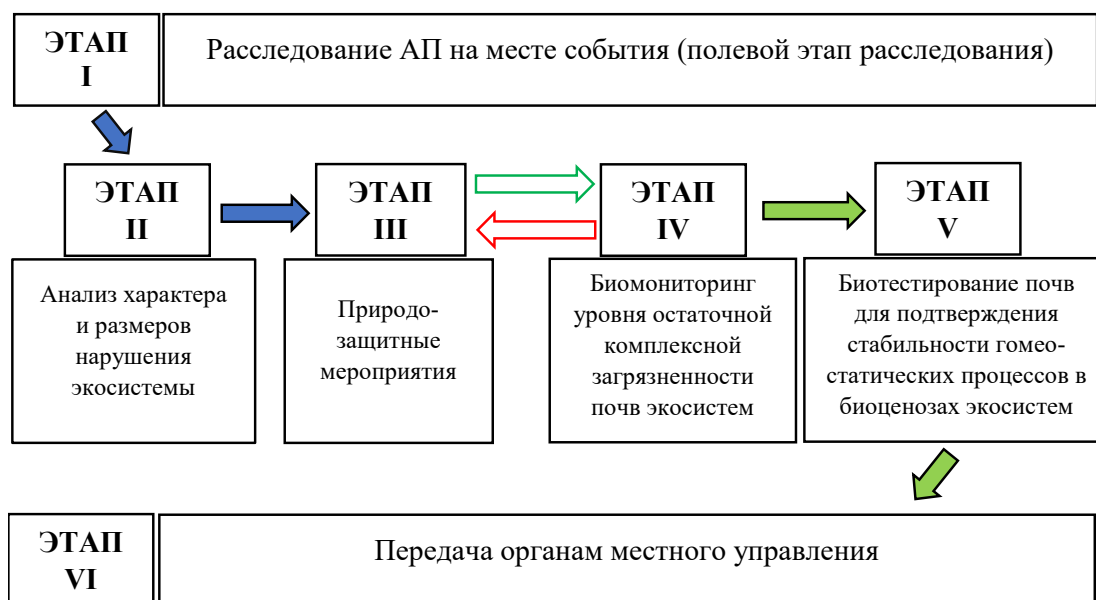


Рисунок 5 – Алгоритм этапов проведения работ на места АП

Предлагается методы биомониторинга применять на этапах 4,5 и частично в отдельных местах территории на этапе 3.

Выводы. Проведенный комплекс работ позволяет рекомендовать применение методики биотестирования с использованием штаммов *Vibrio aquamarinus* и *Escherichia coli* для текущей оценки экологического состояния почвы, подвергшейся интенсивному техногенному воздействию на территорию экосистемы.

Штамм *Vibrio aquamarinus* рекомендуется для определения общей токсичности почвы в связи с высокой чувствительностью к широкому спектру токсикантов, доступностью, хорошими ростовыми свойствами и невысокой стоимостью культивирования. Биолюминесцентный анализ проб почв с помощью штамма *E. coli (pIbpA-lux)* позволяет выявить содержание веществ, повреждающих кле-

точные белки, таким как формальдегид и без(α)пирен.

Методика биотестирования люминесцентными штаммами микроорганизмов пригодна для биомониторинга за параметрами интегральной токсичности образцов почвы, загрязнённой в результате АП. Биомониторинг рекомендуется проводить после проведения очистки территории и рекультивации почвы в процессе дальнейшего хода сукцессионного восстановления для заключения о последующем целевом использовании.

Полученные результаты могут быть применены при мониторинге восстановления территорий, загрязнённых при авариях, на иных транспортных объектах и в прочих отраслях экономики.

Перспективы дальнейших изысканий в данном направлении связаны с необходимостью проведения аналогичных экспериментов на месте реального авиационного происшествия с аварийным воз-

душным судном.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Гузий А.Г., Майорова Ю.А. Культура безопасности полетов гражданской авиации. В сборнике: Безопасность жизнедеятельности: современные вызовы, наука, образование, практика. Материалы X Межрегиональной НПК.-Южно-Сахалинск: СахГУ, 2020. С. 50-54. DOI: 10.52606/9785888116135_50
2. Sharov V.D., Vorobyov V.V., Zatuchny D.A. Risk Management Methods in the Aviation Enterprise. Singapore. Springer Verlag, 2021. 214 p. DOI: 10.1007/978-981-16-0092-0_1.
3. Состояние безопасности полетов в гражданской авиации государств-участников соглашения о гражданской авиации и об использовании воздушного пространства в 2022 г. [Электронный ресурс] / Межгосударственный авиационный комитет. 2023. 62 с. URL: <https://mak-iac.org/rassledovaniya/bezopasnost-poletov/> (дата обращения 27.03.2023).
4. Nikolaykin N. Starkov E., Merzlikin I., Korepina N. Environmental Hazards of Aviation Events in Air Transport // Lecture Notes in Machine Engineering (LNME): Proceedings of 10th International Conference on Recent Advances in Civil Aviation. 2022. Pp. 17-25. DOI: 10.1007/978-981-19-3788-0_2
5. Николайкин Н.И., Старков Е.Ю. Уменьшение экологических последствий от воздействия авиационных происшествий // Научный вестник МГТУ ГА. 2016. № 3. С. 129-136.
6. Николайкин Н., Старков Е. Модель эколого-экономического воздействия авиационных происшествий // Предпринимательство. 2016. № 7. С 38-76.
7. Грядунов К.И. Эксплуатационные свойства авиационных горюче-смазочных материалов. М: ИД Академии Жуковского, 2021. 184 с.
8. Gryadunov K.I., Nemchikov M.L., Timoshenko A.N., Melnikova I.S. Problems of Aviation Leaded Gasoline Application on Aircraft // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Ser.5. "5th Interdisciplinary Scientific Forum with International Participation "New Materials and Promising Technologies"" 2020. Vol. 848. P. 012024. DOI: 10.1088/1757-899X/848/1/012024
9. Novikov V.K., Novikov S.V., Tatarinov V.V. Theoretical Fundamentals of Atmospheric Pollution Prevention Methods by Exhausted Gases of Cosmodrome Mechanical-transport Vehicles and Tractors // AIP Conference Proceedings. 44. Ser. "XLIV Academic Space Conference: Dedicated to the Memory of Academician S.P. Korolev and other Outstanding Russian Scientists – Pioneers of Space Exploration" 2021. Vol. 2318. P. 100007. DOI: 10.1063/5.0036034
10. Приказ Минприроды России от 08.07.2010 N 238 (ред. от 18.11.2021) "Об утверждении Методики исчисления размера вреда, причиненного почвам как объекту охраны окружающей среды" [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_104774/ (дата обращения: 31.03.2023).
11. Постановление Правительства РФ от 18.06.1998 N 609 (ред. от 29.12.2020) "Об утверждении Правил расследования авиационных происшествий и инцидентов с гражданскими воздушными судами в Российской Федерации" [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_43232/ (дата обращения: 31.03.2023).
12. Мелехова О.П., Сарапульцева Е.И. Биологический контроль окружающей среды. Москва: Академия, 2010. – 288 с.
13. Dubrova Y.E., Sarapultseva E.I. Radiation-induced Transgenerational Effects in Animals // International Journal of Radiation Biology. 2020. Pp. 1047-1053. DOI: 10.1080/09553002.2020.1793027.
14. Сарапульцева Е.И., Ускалова Д.В., Устенко К.В. Биологические эффекты низкоинтенсивных радиочастотных полей и анализ риска для природных систем // Медицина труда и промышленная экология. 2020. Т. 60. № 9. С. 592-596. DOI: 10.31089/1026-9428-2020-60-9-592-596
15. Ismailov A.D., Aleskerova L.E. Photobiosensors Containing Luminescent Bacteria // Biochemistry. 2015. Vol. 80. № 6. Pp. 733-744.
16. Sarapultseva E.I., Ustenko K., Dubrova Y.E. The Combined Effects of Acute Irradiation and Food Supply on Survival and Fertility in *Daphnia Magna* // Journal of Environmental Radioactivity. 2019. Vol. 199-200. Pp. 75-83.
17. Mitchell R.J., Gu M.B. Characterization and Optimization of Two Methods in the immobilization of 12 Bioluminescent Strains // Biosensors and Bioelectronics. 2006. Vol. 22. Issue 2. Pp. 192-199.
18. Мелехова О.П. Физико-химические особенности реакций эмбриональных биосистем на слабые химические и электромагнитные воздействия // Научные труды VIII Международного конгресса «Слабые и сверхслабые поля и изучения в биологии и медицине». 2018. Том 8. С. 58-59.
19. Николайкина Н.Е., Кудинова В.А. Биомониторинг техногенной нагрузки на почву [Электронный ресурс] // Наукосфера, -2021, № 6-2, С. 8-12. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_46561802_55485818.pdf (дата обращения: 12.04.2023).
20. Сазыкин И.С., Сазыкина М.А., Кудеевская Е.М., Сазыкина М.И. Штамм *Vibrio aquamarinus*, способ определения токсичности проб с его помощью и тест-культура для определения токсичности проб. Патент RU № 2534819 С2, Бюл. № 34, опубл. 10.12.2014. 10 с.
21. ГОСТ 17.4.4.02-2017 "Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа" [Электронный ресурс] // Россельхознадзор. URL: <https://fsvps.gov.ru/ru/fsvps/laws/6554.html> (дата обращения: 31.03.2023).
22. МР 01.019-07 "Определение интегральной токсичности почв с помощью биотеста "Эколом". Методические рекомендации N 01.019-07" (утв. Роспотребнадзором 15.06.2007) [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. URL: www.consultant.ru (дата обращения: 31.03.2023).
23. Rabbow E., Stojicic N, Walrafen D. The SOS-LUX-TOXICITY-Test on the International Space Station // Research in Microbiology. 2006. Vol. 157. Issue 1. Pp. 30-36.

Статья поступила в редакцию 28.09.2023

Статья принята к публикации 15.12.2023

УДК 614.8.084

EDN: EZSGZF

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОХРАНОЙ ТРУДА НА ПРЕДПРИЯТИИ С УЧЕТОМ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ РИСКОВ

© Автор(ы) 2023

SPIN: 1210-8709

AuthorID: 983616

ORCID: 0000-0001-5513-5701

ScopusID: 57203343360

КОРОЛЕВ Илья Викторович, кандидат технических наук,

доцент кафедры «Инженерной экологии и охраны труда»

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

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

SPIN: 1842-7954

AuthorID: 1219521

ORCID: 0009-0007-0304-2918

ScopusID: 57223003011

ЗАКРЕВСКИЙ Андрей Андреевич, аспирант кафедры «Инженерной экологии и охраны труда»

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

(111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1, e-mail: andreyzakrevsky11@mail.ru)

Аннотация: В статье рассматриваются основные изменения в охране труда, связанные с обеспечением безопасности работников путем оценки профессиональных рисков. Оценка профессиональных рисков является базовой процедурой системы управления охраной труда на предприятиях. Был проведен сравнительный анализ процедур оценки профессиональных рисков и специальной оценки условий труда. Показано, что если происходит случай травмы работника, требуется пересмотр опасных ситуаций и источников риска, оценка вероятности различных событий, а также анализ наличия и эффективности принимаемых мер для предотвращения опасных ситуаций. Рассмотрены этапы мероприятий по управлению профессиональными рисками. Рекомендации по выбору методов оценки уровней профрисков и по снижению их уровней содержат критерии, рекомендуемые работодателю при выборе методов оценки уровней профрисков; краткое описание методов анализа профессиональных рисков; описание процесса анализа профессиональных рисков и примеры оценочных средств. Проведен анализ основных методов оценки профессиональных рисков, наиболее часто применяемых на практике, таких как метод Файна–Кинни, матричный метод, чек-лист. Разработана усовершенствованная матрица определения уровня риска, позволяющая учесть разные значения для каждого соотношения вероятность/тяжесть и 100 балльную шкалу.

Ключевые слова: оценка профессиональных рисков, риск, система управления охраной труда, охрана труда, безопасность.

IMPROVING THE OCCUPATIONAL SAFETY MANAGEMENT SYSTEM AT THE ENTERPRISE, TAKEN INTO ACCOUNT OF PROFESSIONAL RISKS

© The Author(s) 2023

KOROLEV Ilya Viktorovich, associate professor, PhD,

associate professor of the Department of Environmental Engineering and Labor Protection

National Research University "MPEI"

(111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, buil. 1, e-mail: koroleviv@mpei.ru)

ZAKREVSKY Andrei Andreevich, postgraduate student of the Department

of Environmental Engineering and Labor Protection

National Research University "MPEI"

(111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, buil. 1, e-mail: andreyzakrevsky11@mail.ru)

Abstract. The article discusses the main changes in labor protection related to ensuring the safety of workers by assessing occupational risks. Occupational risk assessment is a basic procedure for the occupational safety management system at enterprises. A comparative analysis of procedures for assessing occupational risks and special assessment of working conditions was carried out. It is shown that if an employee injury occurs, a review of dangerous situations and sources of risk, an assessment of the likelihood of various events, as well as an analysis of the availability and effectiveness of measures taken to prevent dangerous situations are required. The stages of measures to manage professional risks are considered. Recommendations for choosing methods for assessing levels of professional risks and for reducing their levels contain criteria recommended to the employer when choosing methods for assessing levels of professional risks; a brief description of methods for analyzing occupational risks; description of the occupational risk analysis process and examples of assessment tools. An analysis of the main methods for assessing professional risks, most often used in practice, such as the Fine-Kinney method, matrix method, checklist, was carried out. An improved matrix for determining

the risk level has been developed, allowing for different values for each probability/severity ratio and a 100-point scale to be taken into account.

Keywords: occupational risk assessment, risk, labor protection management system, labor protection, safety.

Для цитирования: Королев И.В. Совершенствование системы управления охраной труда на предприятии с учетом профессиональных рисков / И.В. Королев, А.А. Закревский // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 12. – № 4(64). – С. 266-271. – EDN: EZSGZF.

Введение. Вступившие в силу изменения X главы Трудового кодекса (ТК) имели целью повышение безопасного выполнения работ на производстве, в том числе и на энергетических предприятиях. Работы в электроэнергетике сопряжены с потенциальным риском возникновения различных ситуаций, которые могут привести как к травмам и несчастным случаям с персоналом, так и серьезным материальным убыткам и негативным экологическим последствиям [1, 2]. Среди нововведений в области охраны труда – риск-ориентированный подход (РОП) с учетом факторов и обстоятельств, которые вызвали или могут вызвать травмы или несчастные случаи среди работников. РОП нацелен на создание и поддержание мероприятий, ориентированных на профилактику, с целью обеспечения оптимальных условий для выполнения трудовых обязанностей [3].

Согласно ст. 214 ТК работодатель обязан регулярно выявлять опасности и профессиональные риски, проводить их систематический анализ и оценку [4]. Работодатель должен создать систему управления охраной труда (СУОТ), включающую оценку профессиональных рисков, оценку уровня профессиональных рисков (ОПР) необходимо проводить перед введением в эксплуатацию новых производственных объектов и организацией новых рабочих мест. Это необходимо для создания безопасных условий работы и уменьшения количества травм на рабочем месте.

Профессиональный риск представляет собой вероятность нанесения вреда здоровью работника вследствие воздействия вредных и/или опасных производственных факторов при выполнении им трудовых обязанностей. Факторы могут быть самые различные в зависимости от специфики предприятия [1, 2, 5]. Например, на энергетических предприятиях могут быть механические: падение с высоты, уколы, порезы или, связанные с микроклиматом – холодом, жарой, высокой влажностью, отчего у человека может ухудшиться самочувствие. Также есть риск получения работником электротравм как при работах в электроустановках, так и попадание под напряжение шага, например при обрыве и падении провода под напряжением [6, 7].

Приказ Минтруда России от 29.10.2021 № 776н, "Об утверждении Примерного положения о системе управления охраной труда", предназначен для помощи работодателям в соблюдении требований по охране труда через создание, внедрение и обеспечение функционирования СУОТ в организации. Он

также определяет порядок реализации мероприятий по управлению профессиональными рисками. [8]:

а) выявление опасностей (Приказ Минтруда России от 31.01.2022 № 36 «Об утверждении Рекомендаций по классификации, обнаружению, распознаванию и описанию опасностей» [9]);

б) оценка опасностей (Приказ Минтруда России от 28.12.2021 № 926 «Об утверждении Рекомендаций по выбору методов оценки уровней профессиональных рисков и по снижению уровней таких рисков» [10]);

в) управление профрисками.

Оценка рисков включает в себя выявление опасностей, которые могут возникнуть в процессе трудовой деятельности сотрудника, а также определение степени и серьезности потенциальных последствий. Данная процедура позволяет узнать и спрогнозировать опасные события, которые могут произойти, причины их возникновения, последствия этих событий и вероятность их возникновения и способы её снижения.

В положении представлена новая политика в области охраны труда (п.10 нового положения), которая призвана: обеспечивать безопасные условия труда и управлять профрисками и профзаболеваниями; соответствовать экономической деятельности и особенностям уровней профрисков в организации; отражать цели охраны труда; включать обязательство работодателя по устранению опасностей и снижению уровней профрисков; совершенствовать систему управления охраной труда; учитывать мнение профсоюзов.

На предприятиях подход к оценке и управлению профессиональными рисками позволяет учитывать специфику конкретной сферы деятельности и принимать меры по предотвращению производственных травм и заболеваний [11, 12, 13]. Это, в свою очередь, способствует увеличению производительности и эффективности производственного процесса. Например, для повышения уровня промышленной безопасности и уменьшения риска травмирования на предприятиях разработана и внедрена модель управления риском травмирования [14, 15].

Существуют разные методики оценки риска, однако у каждой из них есть свои недостатки [15]. Некоторые методики могут быть слишком упрощенными, что приводит к недооценке или переоценке риска. Другие могут быть слишком сложными и требовать большого объема данных или экспертных знаний, что делает их непрактичными для реальной работы. Некоторые методи-

ки оценки риска могут быть субъективными и подвержены влиянию личного мнения или предвзятости экспертов, в то время как другие могут игнорировать возможность влияния внешних факторов на риски. Кроме того, некоторые методики могут быть неприменимы в определенных областях или сферах деятельности [16].

Методология. В работе был проведен анализ наиболее распространенных методик оценки риска с целью разработки усовершенствованной матрицы оценки рисков, а также сравнение процедур оценки профессиональных рисков (ОПР) и специальной оценкой условий труда (СОУТ) в системе управления охраной труда (СУОТ). Из анализа процедуры ОПР видно, что существует процедура, которая напоминает оценку профессиональных рисков. Эта процедура называется специальной оценкой условий труда (СОУТ). Например, если происходит случай травмы работника, требуется пересмотр опасных ситуаций и источников риска, оценка вероятности различных событий, а также анализ наличия и эффективности принимаемых мер для предотвращения опасных ситуаций. Это позволяет учесть влияние всех производственных факторов на организм работника [17].

Сравнение процедур ОПР и СОУТ в рамках СУОТ показало, что в ходе расчета профессиональных рисков, несмотря на то, что также выполняется идентификация, как и в СОУТ, в данной процедуре требуется оценка вероятности риска, в отличие от определения уровня его воздействия. Часто результаты специальной оценки условий труда могут быть использованы при оценке профессиональных рисков. Рекомендации по выбору методов оценки уровней профрисков и по снижению их уровней приведены в приказе Минтруда от 28.12.2021 №926, в которых содержатся: критерии, которые рекомендуются работодателю при выборе методов оценки уровней профрисков; краткое изложение методов анализа профессиональных рисков; обзор процесса анализа профессиональных рисков и примеры оценочных средств [10, 18]. В данном документе представлены различные методики с примерами их применения.

Рекомендации по классификации, обнаружению, распознаванию и описанию опасностей даны в Приказе Минтруда РФ от 31.01.2022 г. № 36. ГОСТ Р 58771-2019 рассматривает более 40 методов анализа и оценки рисков.

Наиболее распространенные методы оценки риска приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Наиболее распространенные методы оценки риска

	Матричный	Метод Файна и Кинни	Чек-лист
Описание метода	Уровень риска вычисляется на основе заранее разработанной матрицы, которая учитывает сочетание тяжести последствий и вероятности возникновения неблагоприятных событий	Общая оценка риска определяется путем умножения баллов, связанных с вероятностью, частотой и степенью тяжести события	Каждое рабочее место подвергается проверке на соответствие требованиям безопасности, и составляется индивидуальный список контрольных пунктов (чек-лист).
Преимущества	<ul style="list-style-type: none"> не требует значительных временных и финансовых затрат; простое ранжирование рисков; простота и наглядность 	<ul style="list-style-type: none"> простой расчет; количественная оценка рисков; доступность и понятность. 	<ul style="list-style-type: none"> доступность; простота; возможно проведение на любых этапах работ
Недостатки	<ul style="list-style-type: none"> низкая объективность экспертной оценки упрощение оценки 	субъективность, которая нивелируется приглашением сторонних экспертов	<ul style="list-style-type: none"> высокая вероятность поверхностного подхода применение только для известных опасностей

Работодатель определяет собственный метод определения и идентификации опасных ситуаций. По завершении процесса идентификации следует составить список выявленных опасностей, либо воспользоваться электронным реестром опасностей.

Метод Файна-Кинни представляет собой метод оценки рисков, основанный на умножении трех основных компонентов: уровня воздействия опасности на рабочем месте, вероятности возникновения угрозы на рабочем месте и серьезности последствий для работников в случае реализации угрозы [19].

Метод матричного анализа основан на оценке вероятности возникновения опасных ситуаций и оценке степени их воздействия на безопасность и здоровье сотрудников. Этот метод учета рисков учитывает взаимосвязь между вероятностью возникновения опасности и тяжестью возможных последствий. В матрице используются весовые

коэффициенты (баллы) для оценки как вероятности, так и степени тяжести ущерба. Уровень риска определяется перемножением баллов для каждого параметра вероятности и степени тяжести для каждой выявленной опасности (табл. 2) [10].

Чек-лист – представляет перечень рисков, разрабатываемых для каждого рабочего места, которые оцениваются условиями да/нет.

Разрабатывают индивидуальный чек-лист с конкретными опасностями и проверяют рабочее место на соответствие.

Недостатки существующей матрицы определения рисков:

- одному и тому же значению соответствует разное значение соотношения вероятность/тяжесть;
- неудобство оценки тяжести последствий;
- привычнее восприятие значений по столбальной шкале, так как неудобно воспринимать значения 10 из 25.

Таблица 2 – Матричный метод на основе балльной оценки (матрица «5x5» N2)

Вероятность	Очень редко	Маловероятно	Может быть	Вероятно	Почти наверняка
Тяжесть последствий	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Катастрофическая (5)	5	10	15	20	25
Значительная (4)	4	8	12	16	20
Средняя (3)	3	6	9	12	15
Низкая (2)	2	4	6	8	10
Незначительная (1)	1	2	3	4	5

Результаты. Для повышения безопасности труда и снижения уровня рисков предлагается усовершенствованная матрица оценки профрисков:

- вводятся разные значения для каждого соотношения вероятность/тяжесть;
- тяжесть рассматривается по приказу Минздрава

№194 от 24.04.2008 г. [20];

• система разработана для 100 балльной шкалы, что более удобно и наглядно для восприятия.

Предложения по совершенствованию матрицы оценки профрисков позволяют повысить безопасность труда работников (рис. 1, табл. 3).

		степень тяжести вреда, причиненного здоровью человека							
		легкий вред здоровью		средняя тяжесть вреда здоровью		тяжелый вред здоровью			
		повреждения, не причинившие вред здоровью человека (поверхностные повреждения, незначительная стойкая утрата общей трудоспособности)	кратковременное расстройство здоровья (временная нетрудоспособность до 21 дня включительно)	длительное расстройство здоровья (временная нетрудоспособность от 22 до 120 дней)	стойкая утрата общей трудоспособности (свыше 120 дней)	вред здоровью, опасный для жизни человека, который непосредственно создает угрозу для жизни	вред здоровью, опасный для жизни человека, вызвавший расстройство жизненно важных функций организма человека, полная утрата профессиональной трудоспособности		
		код	T1	T2	T3	T4	T5	T6	
вероятность наступления события	маловероятная	событие, возникновение которого практически невозможно	V1	4	9	12	14	15	44
	низкая	событие, которое возникает редко и нерегулярно	V2	5	10	13	34	40	46
	средняя	событие, которое возникает время от времени, но не нерегулярно	V3	6	11	28	36	42	80
	повышенная	событие, которое возникает время от времени, и регулярно	V4	7	22	30	38	65	85
	высокая	событие, которое возникает часто и регулярно	V5	8	24	32	55	70	90
	сверхвысокая	событие, которое однозначно произойдет	V6	20	26	50	60	75	100

Рисунок 1 – Матричный метод на основе балльной оценки

Таблица 3 – Значимость риска и меры контроля/снижения уровня риска

Значимость (категория) риска	Необходимость проведения мероприятий для снижения риска
Низкий	Зона наиболее допустимого низкого уровня риска. Риск, выделенный зеленым цветом, считается приемлемым и не требует дополнительных мер для управления. Требуется поддерживать риск на текущем уровне.
Умеренный	Риск, выделенный желтым цветом, может быть уменьшен до уровня, который является практически обоснованным через внедрение мер защиты. Это подразумевает необходимость разработки плана по снижению и/или исключению риска, а также определение временных рамок для выполнения этих мероприятий. Важно уделять внимание соблюдению установленных сроков при реализации мер по снижению риска.
Высокий	Риски находятся в недопустимой зоне. Выделенные красным цветом, требуют снижения или полного исключения. Необходимо определять немедленное устранение существенных рисков, временную приостановку работ до ликвидации рисков или разрабатывать и реализовать мероприятия по уменьшению и/или исключению рисков в установленные сроки.

Обсуждение. При сравнении процедур ОПР и СОУТ в СУОТ следует отметить, что оценка профессионального риска учитывает все имеющиеся производственные факторы, а класс условий труда, устанавливаемый при специальной оценке условий труда, только идентифицированные вредные факторы.

Разработанная усовершенствованная матрица определения уровня риска, позволяющая учесть разные значения для каждого соотношения вероятность/тяжесть и 100 балльную шкалу, хотя и повышает точность и удобство расчета уровня риска, но не лишена недостатков. Матричный метод неприменим для оценки сложных систем или множества рисков, поскольку его функциональность ограничивается матрицей риска. Кроме того, он может игнорировать изменения в рисках со временем, что снижает его эффективность при постоянной оценке рисков.

Выводы. Учёт изменений в охране труда для оценки профрисков в СУОТ позволяет повысить безопасность труда и снизить вероятность получения травм работников.

Разработана усовершенствованная матрица определения уровня риска, позволяющая учесть разные значения для каждого соотношения вероятность/тяжесть и 100 балльную шкалу. Тяжесть рассматривается по приказу Минздрава №194 от 24.04.2008 г.

В соответствии с законодательством, работодатель имеет обязанность вести учет и анализировать обстоятельства и причины несчастных случаев, а также проводить оценку профессиональных рисков (ОПР) в рамках системы управления охраной труда (СУОТ) на предприятиях.

Согласно законодательству, работодатель обязан вести учет и рассматривать обстоятельства и причины несчастных случаев, а также проводить ОПР в рамках СУОТ на предприятиях. Данное мероприятие способствует обеспечению безопасности и защите здоровья работников, а работодатели соблюдают требования нормативно правовых документов и несут ответственность за условия труда в своих предприятиях. Внедренный РОП в управлении профессиональными рисками помогает своевременно выявлять возможные опасности и предотвращать несчастные случаи на производстве. Работодатель может сам устанавливать порядок выявления и идентификации опасностей и использовать наиболее распространенные методы оценки риска, такие как метод Файна-Кинни, матричный метод, чек-лист.

Сравнение процедур ОПР и СОУТ в рамках СУОТ показало, что в процедуре ОПР необходимо оценить вероятность риска в отличии определения его уровня воздействия, как в процедуре СУОТ.

В рамках процедуры оценки и управления профессиональными рисками, помимо выявления и оценки рисков, также предусмотрены их последующий контроль и снижение. Компетентное проведение процесса оценки и управления профес-

сиональными рисками составляет важную часть системы управления охраной труда (СУОТ), что не только позволяет анализировать существующие риски, но и предотвращать возникновение новых, повышая уровень безопасности труда на предприятиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Охрана труда при работах на высоте / И.В. Королев, А.А. Завьялова, А.М. Боровкова, Н.В. Звонкова // *Электротехника. Передача и распределение*. – 2019. – № 5(56). – С. 124-129.
2. Закревский, А.А. Повышение безопасного выполнения работ на предприятии при учете микротравм / А.А. Закревский // *Перспектив Свободный* – 2023: Материалы XIX Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Красноярск, 24–29 апреля 2023 года. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2023. – С. 2760-2762.
3. Роль системы оценки профессиональных рисков в системе управления охраной труда в организации / М.А. Садовников, Г.Г. Попов, Д.В. Семин А.А. Рыжкова // *Вестник аграрной науки Дона*. 2019. № 4 (48). С. 102-107.
4. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 25.02.2022) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.03.2022).
5. Королев, И.В. Влияние параметров электрической дуги на выбор СИЗ персонала электроэнергетики / И.В. Королев, И.С. Галунов, О.С. Щербачева // *Электротехника. Передача и распределение*. – 2020. – № 3(60). – С. 120-124. – EDN ZF-TRGI.
6. Анализ применяемых мер по обеспечению безопасности при производстве работ под напряжением в электроустановках / А.С. Тимченко, И.В. Королев, Д.А. Бурдюков, Н.В. Васильева // *Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ*. – 2022. – № 2. – С. 113-118. – DOI 10.24160/1993-6982-2022-2-113-118.
7. Determination of maximum allowable step voltage in area of air power line wire drop / I. Korolev, A. Zakrevsky, D. Burdyukov, V.T. Medvedev // *Proceedings of the 2022 4th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2022: 4, Moscow, 17-19 марта 2022 года*. – Moscow, 2022. – DOI 10.1109/REEPE53907.2022.9731383. – EDN RKLAEI.
8. Приказ Минтруда России № 776н от 29 октября 2021 г. «Об утверждении Примерного положения о системе управления охраной труда»
9. Приказ Минтруда России от 31.01.2022 № 36 «Об утверждении Рекомендаций по классификации, обнаружению, распознаванию и описанию опасностей»
10. Приказ Минтруда от 28.12.2021 г. № 926 «Рекомендации по выбору метода оценки уровня профессионального риска и по снижению уровня такого риска»
11. Королев, И.В. Анализ применения средств индивидуальной защиты для электромонтеров на основании трудовых функций профессионального стандарта / И.В. Королев, А.А. Закревский, Д.А. Шамин // *Вестник НЦБЖД*. – 2023. – № 1(55). – С. 131-137.
12. Кондратьева, О.Е. Разработка методики оценки риска ущерба здоровью работников электроэнергетической отрасли / О.Е. Кондратьева, М.В. Кравченко, О.А. Локтионов // *Безопасность труда в промышленности*. – 2019. – № 4. – С. 63-68. – DOI 10.24000/0409-2961-2019-4-63-68. – EDN SRIDSB.
13. Локтионов, О.А. Разработка повышающего коэффициента профессии для работников электросетевого комплекса при оценке профессионального риска / О.А. Локтионов, М.В. Кравченко // *Безопасность и охрана труда* – 2019: молодежная программа в рамках Международной выставки – конкурса БИОТ, Москва, 10–13 декабря 2019 года / Ассоциация разработчиков, изготовителей и поставщиков средств индивидуальной защиты. – Москва: Б. и., 2019. – С. 95-98. – EDN OTSMXL.
14. Об оценке тождественности использования матричных методов при оценке профессиональных рисков / Д.С. Алешков, М.В. Суковин, Е.В. Куцупалова, Р.Н. Профатилов

// Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2(63). – С. 16-21. – EDN VJYNGZ.

15. Локтионов, О.А. Разработка риск-ориентированной модели предиктивной оценки смертельного травматизма в электроэнергетической отрасли: специальность 05.26.01 "Охрана труда (по отраслям)": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Локтионов Олег Александрович, 2021. – 158 с.

16. Локтионов, О.А. Разработка индикатора оценки риска ущерба здоровью работников энергетической отрасли / О.А. Локтионов, М.В. Кравченко // Радиозлектроника, электротехника и энергетика: Тезисы докладов, Москва, 14–15 марта 2019 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Центр полиграфических услуг "РАДУГА", 2019. – С. 455. – EDN DANUKY.

17. Совершенствование системы управления охраной труда и промышленной безопасностью с учетом анализа и прогнозирования производственного микротравматизма / Е.Н. Рыжиков, Е.В. Климова, Е.А. Носатова, В.П. Хлусова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. – № S7. – С. 194-205. – DOI 10.25018/0236-1493-2019-4-7-194-205. – EDN VZQNPW.

18. Основные подходы к оценке риска ущерба здоровью персонала на предприятиях электроэнергетики / О.Е. Кондратьева, О.А. Локтионов, М.В. Кравченко [и др.] // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2019. – № 3(54). – С. 122-125. – EDN YUXYVE.

19. Тимченко, А.С. Обеспечение безопасности персонала при производстве работ под напряжением / А.С. Тимченко, И.В. Королёв // Сборник трудов Конкурса научно-исследовательских работ (Конкурса НИР): Материалы Молодежной программы 26-ой Международной специализированной выставки и Форума, Москва, 06–09 декабря 2022 года. – Москва: Ассоциация разработчиков, изготовителей и поставщиков средств индивидуальной защиты, 2023. – С. 232-235. – EDN VLUINJ.

20. Приказ Министерства здравоохранения и социального развития Российской Федерации от 24 апреля 2008 г. N 194н «Об утверждении медицинских критериев определения степени тяжести вреда, причиненного здоровью человека».

Статья поступила в редакцию 09.11.2023

Статья принята к публикации 15.12.2023

УДК 574.5; 572.4

EDN: ИКВДКХ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОВМЕСТНОГО ВЛИЯНИЯ ПОЛЛЮТАНТОВ НА ФИТОТОКСИЧНОСТЬ ПОЧВ ПРИБРЕЖНЫХ ЗОН ВНУТРЕННИХ ВОДНЫХ ПУТЕЙ

© Автор(ы) 2023

SPIN: 3822-7136

AuthorID: 000000

ORCID: 0000-0002-2352-2659

МЯСНИКОВА Ирина Борисовна, кандидат химических наук, доцент,
доцент кафедры «Охрана окружающей среды и производственная безопасность»

Волжский государственный университет водного транспорта

(603950, Россия, г. Нижний Новгород, улица Нестерова, 5, e-mail: irina120669@yandex.ru)

ORCID: 0000-0002-9110-7334

ПАВЛОВА Светлана Михайловна, аспирант,

ассистент кафедры «Охрана окружающей среды и производственная безопасность»

Волжский государственный университет водного транспорта

(603950, Россия, г. Нижний Новгород, улица Нестерова, 5, e-mail: s.pavlova2774334@gmail.com)

ORCID: 0009-0005-7884-967

МОРОЗОВА Анастасия Владимировна, аспирант

Волжский государственный университет водного транспорта

(603950, Россия, г. Нижний Новгород, улица Нестерова, 5, e-mail: morozova.nastja@yandex.ru)

Аннотация. В настоящее время в городской среде и вблизи транспортных магистралей, в том числе, прибрежных зон внутренних водных путей, при развитой промышленности в почву ежедневно попадает огромное количество загрязнителей, большая часть которых представлена нефтепродуктами и тяжелыми металлами, что приводит к деградации почвенного покрова этих зон. Кроме того, поллютанты действуют длительное время, и данное явление носит накопительный характер. Это приводит к тому, что почва перестает выполнять свою основную функцию – обеспечение нормальных условий для развития растений. В результате наблюдается угнетение растительности, что ведет к усилению ветровой эрозии почвы и, следовательно, ухудшению качества воздуха. Именно, исходя из недостаточной оценки описываемой проблемы, целью для нашего исследования мы выбрали изучение совместного влияния поллютантов на фитотоксичность почв в зависимости от времени экспозиции последних. Определение фитотоксичности почв проводилось методом проростков в соответствии с ГОСТ 32627-2014 и ГОСТ Р ИСО 22030-2009. Определены математические уравнения зависимости фитотоксичности от концентраций поллютантов и от времени экспозиции. Оценено влияние фактора времени контакта поллютантов с почвой на ее фитотоксичность.

Ключевые слова: нефтепродукты, тяжелые металлы, фитотоксичность, совместное влияние, поллютанты, математическое уравнение.

DETERMINATION OF THE JOINT EFFECT OF POLLUTANTS ON PHYTOXICITY OF SOILS OF COASTAL ZONES OF INLAND WATERWAYS

© The Author(s) 2023

MYASNIKOVA Irina Borisovna, candidate of chemical sciences, associate professor, associate professor of the
department of environmental protection and industrial safety

Volga State University of Water Transport

(603950, Russia, Nizhny Novgorod, street Nesterova, 5, e-mail: irina120669@yandex.ru)

PAVLOVA Svetlana Mikhailovna, assistant of the department of environmental protection and industrial safety

Volga State University of Water Transport

(603950, Russia, Nizhny Novgorod, street Nesterova, 5, e-mail: s.pavlova2774334@gmail.com)

MOROZOVA Anastasia Vladimirovna, post-graduate student

Volga State University of Water Transport

(603950, Russia, Nizhny Novgorod, street Nesterova, 5, e-mail: morozova.nastja@yandex.ru)

Abstract. Currently, in the urban environment and near transport highways with a developed industry, a huge amount of pollutants enters the soil every day, most of which are represented by petroleum products and heavy metals. This leads to the degradation of the soil cover of these zones. In addition, pollutants act for a long time, and this phenomenon is cumulative. This situation leads to the fact that the soil ceases to perform its main function – providing normal conditions for the development of plants. As a result, vegetation is suppressed, which leads to increased wind erosion of the soil and, as a result, deterioration of air quality. Precisely, based on the insufficient assessment of the described problem, we chose the joint effect of pollutants on the phytotoxicity of soils, depending on the exposure time of the latter, as the goal for our study. Determination of phytotoxicity of soils was carried out by the method of seedlings in accordance with GOST 32627-2014 and GOST R ISO 22030-2009. Mathematical equations of dependence of phytotoxicity on concentrations

of pollutants and on exposure time were determined. The influence of the time factor of contact of pollutants with the soil on its phytotoxicity was evaluated.

Keywords: oil products, heavy metals, phytotoxicity, joint effect, pollutants, mathematical equation.

Для цитирования: Мясникова И.Б. Определение совместного влияния загрязнителей на фитотоксичность почв прибрежных зон внутренних водных путей / И.Б. Мясникова, С.М. Павлова, А.В. Морозова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 12. – № 4(64). – С. 272-278. – EDN: IKBDKX.

Введение. Вместе с развитием техносферы, мы наблюдаем интенсивный темп деградации окружающей среды [1]. В настоящее время в городской среде при развитой промышленности в почву ежедневно попадает большое количество загрязнителей, основная часть которых представлена нефтепродуктами (НП) и тяжелыми металлами (ТМ) [2-4]. Это приводит к деградации почвенного покрова в городской среде. Кроме того, загрязнители действуют длительное время, и данное явление носит накопительный характер [5]. Подобный процесс происходит не только в городской среде, но и у транспортных магистралей, в том числе в прибрежных зонах внутренних водных путей [6-11]. Данная ситуация была нами зафиксирована в 2016 [12] при обследовании почв водоохранной зоны правого берега р. Волга в пределах г. Нижнего Новгорода. Это ведет к тому, что почва перестает выполнять свою основную функцию – снабжение растений всем необходимым для нормального развития [13, 14]. В результате наблюдается угнетение их роста, что ведет к усилению ветровой эрозии почвы и, как следствие, ухудшению качества воздуха. Именно, исходя из-за недостаточной оценки этой проблемы, целью нашего исследования явилось изучение совместного влияния загрязнителей на фитотоксичность (ФТ) почв в зависимости от времени экспозиции последних.

Поскольку изучать качество почвы чисто химическими методами затруднительно и не рационально, в своей работе мы использовали интегральный метод диагностики почв – биоиндикацию, а именно определение ФТ. В данной работе определение ФТ почв проводили методом проростков в соответствии с ГОСТ 32627-2014 и ГОСТ Р ИСО 22030-2009. Данный метод характеризуется простотой анализа, высокой скоростью проведения анализа и невысокой стоимостью работ, а также позволяет за один вегетативный период провести оценку качества почвы [15, 16].

Почва является природным сорбентом, и поэтому препятствует поступлению загрязнителей в подземные и поверхностные воды. В почве эти вещества вступают в различные геохимические процессы, и многократно трансформируются. В конечном итоге, уменьшается токсическое действие этих веществ на организмы. Но в первый момент времени, пока загрязнители находятся в поглощенном состоянии, они оказывают сильное токсическое действие на растительность, что приводит к деградации почв [5, 17, 18, 19].

В 2019 г. площадь нарушенных земель составила

1076,9 тыс. га, что на 4,5 тыс. га больше, чем в предыдущем году. Наибольшая часть нарушенных земель была обнаружена в категории земель промышленности, энергетики, транспорта, связи, радиовещания, телевидения, информатики, земель для обеспечения космической деятельности, земель обороны, безопасности и земель иного специального назначения (Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2019 году»).

Поэтому целью данной работы является определение совместного влияния ТМ и НП на ФТ почвы во времени.

Методология. Исследование ФТ проводили в соответствии с ГОСТ 32627-2014 и ГОСТ Р ИСО 22030-2009. Для определения ведущего фактора фитотоксического эффекта НП и ТМ почв прибрежных зон внутренних водных путей определили ФТ модельных систем: почвогрунт – НП – ТМ. Почвогрунт загрязняли НП и ТМ (катионами железа III) из расчета ОПДК, 0,25ПДК, 0,5ПДК, 1ПДК и 2ПДК. ПДК (НП) = 2г/кг (средний уровень загрязнения) ПДК (ТМ) подвижная форма = 0,5 г/кг в соответствии с ГН 2.1.7.2041-06.

Расчет ФТ проводили по формуле (1)

$$ФТ = (1 - N_i / N_{\phi}) \cdot 100\% \quad (1)$$

где N_i – число проростков в i -ой модельной системе, N_{ϕ} – число проростков в модельной системе без загрязнений.

Время экспозиции загрязнителей составило от 1 до 5 месяцев. Ранее мы определили [20], что результаты фитотоксичности по проросткам на первые сутки с момента посева, а также по длине корня на четвертый день эксперимента наиболее информативны. В качестве тест-культуры был выбран редис [20, 21].

Результаты. Ошибка определения ФТ не превышала 12%. Результаты эксперимента представлены на рисунках 1 - 4. На данных рисунках четко прослеживается зависимость ФТ проростков на первые сутки от превышения норм ПДК, а также по времени экспозиции загрязнения ТМ и НП.

С помощью программного комплекса STATISTICA 8.0 определили математическую зависимость средней ФТ от содержания НП и ТМ, как и в работе [6].

Подобные зависимости были построены на время экспозиции загрязнителей 1 месяц – рисунок 5; 3 месяца – рисунок 7; 5 месяцев – рисунок 9. Также были найдены математические уравнения зависимости ФТ от концентрации НП и ТМ и построены соответствующие графики математических моделей рисунки 6, 8, 10.

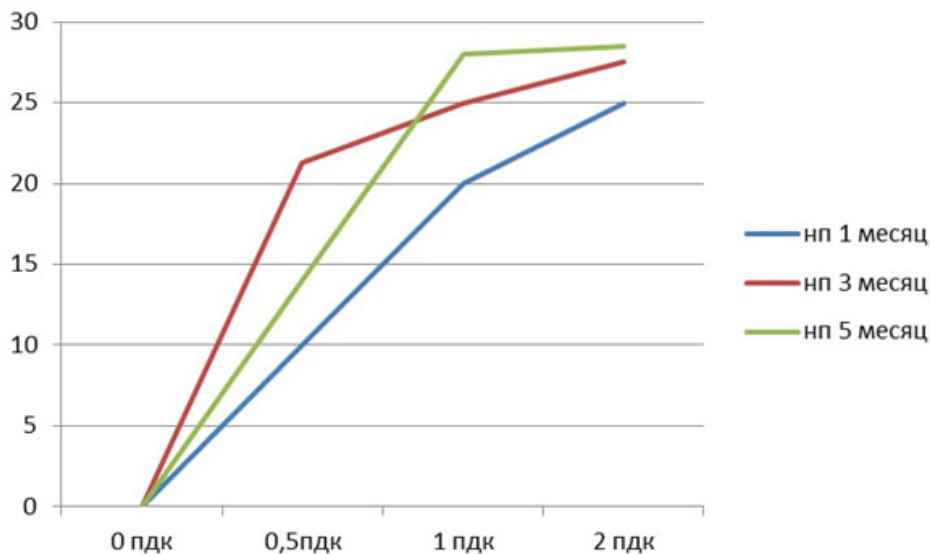


Рисунок 1 – Зависимость фитотоксичности ФТ от концентрации НП по проросткам на первые сутки во времени

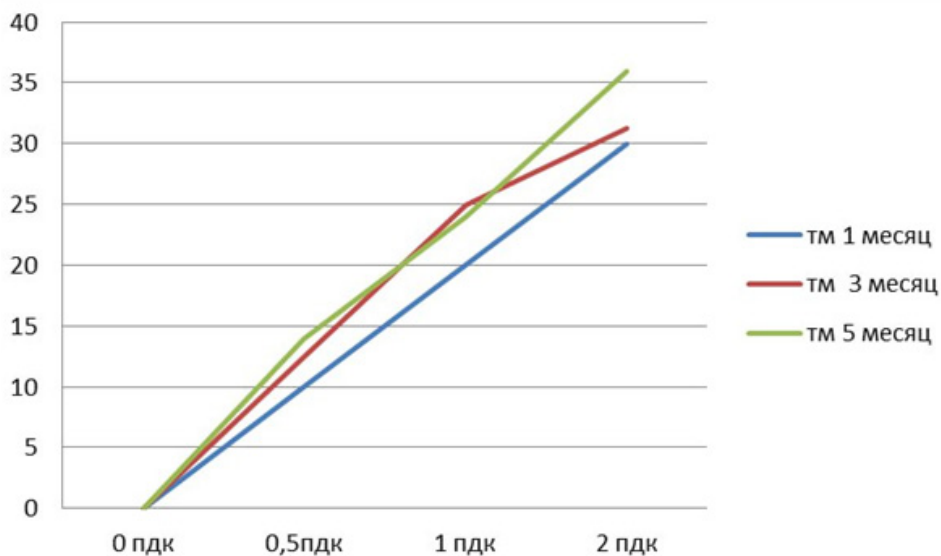


Рисунок 2 – Зависимость ФТ от концентрации ТМ по проросткам на первые сутки во времени

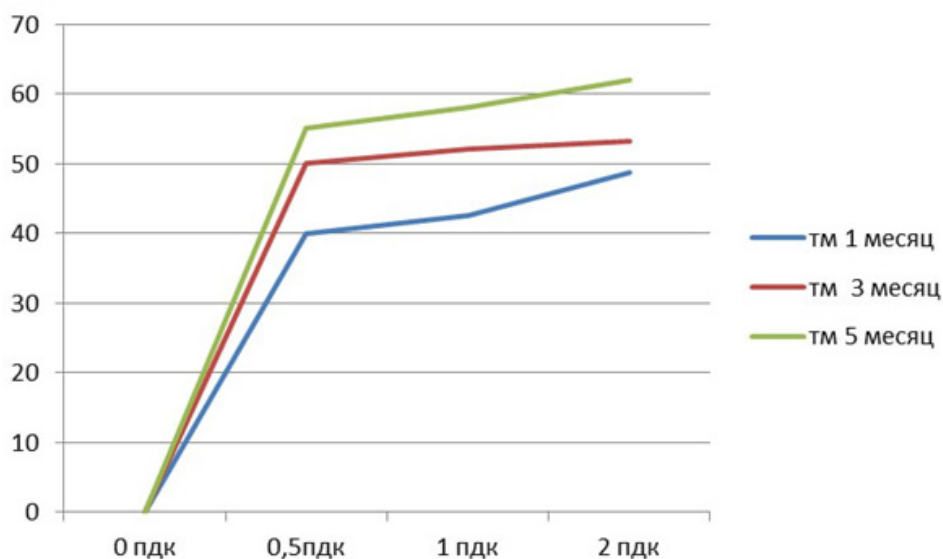


Рисунок 3 – Зависимость ФТ от концентрации ТМ по длине корня во времени

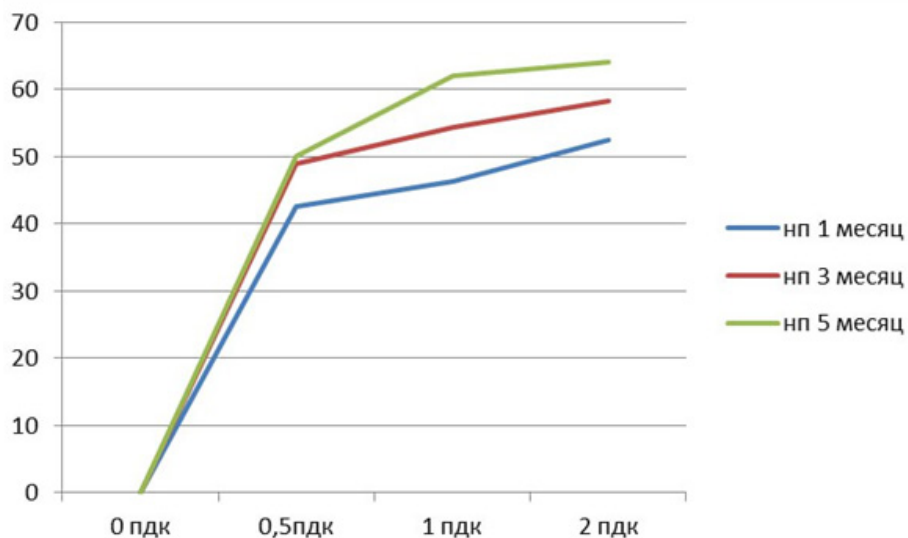


Рисунок 4 – Зависимость ФТ от концентрации НП по длине корня во времени

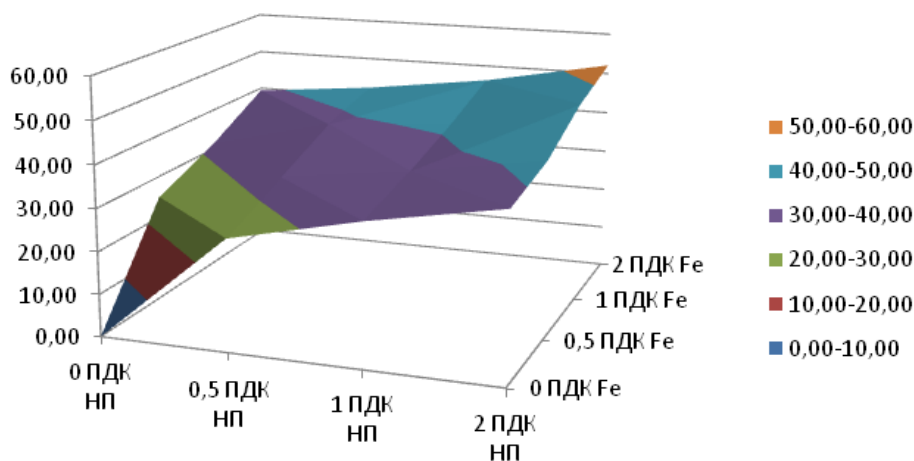


Рисунок 5 – Зависимость ФТ от концентрации загрязнителей на 1 месяц экспозиции

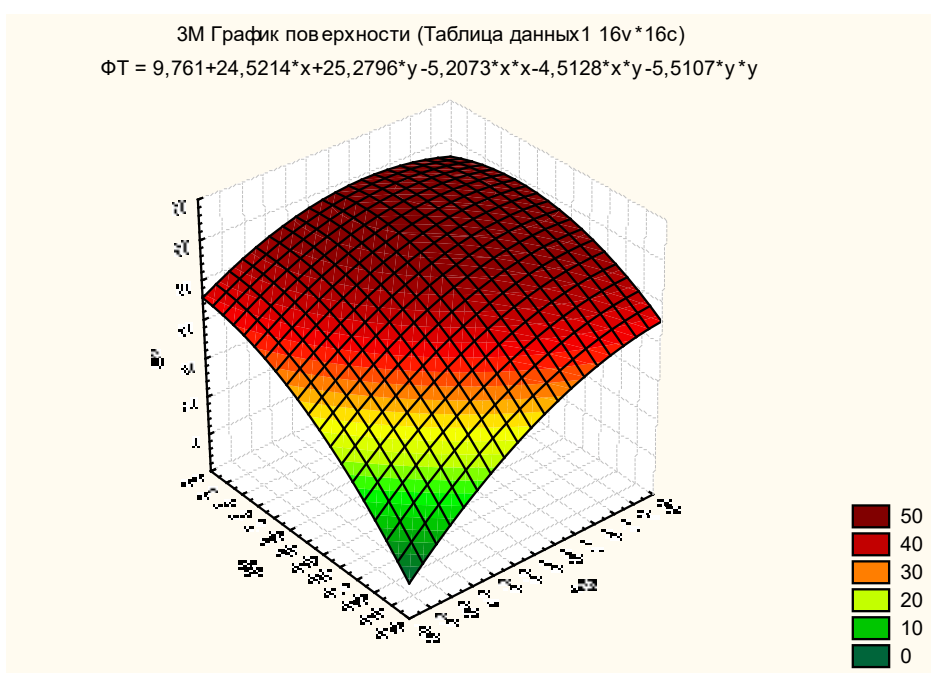


Рисунок 6 – График и зависимость ФТ почвы от совместного влияния НП и ТМ. Время экспозиции – 1 месяц

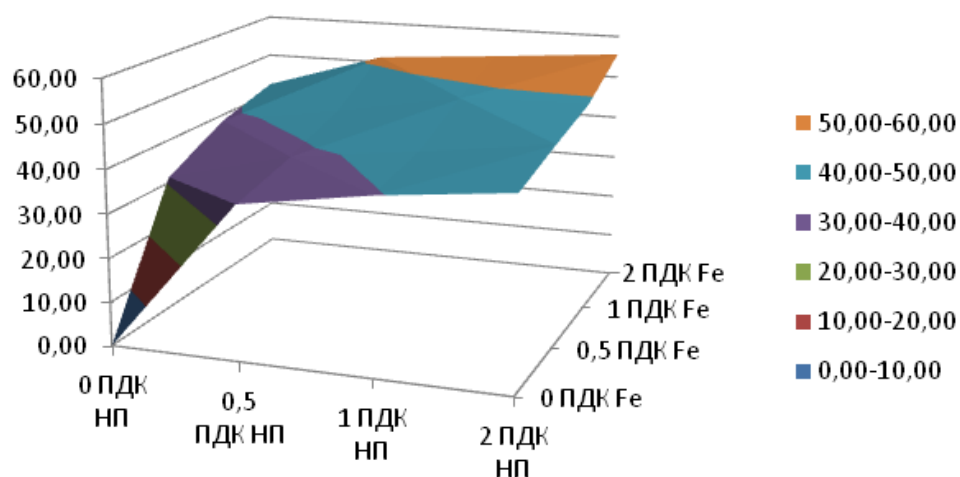


Рисунок 7 – Зависимость ФТ от концентрации загрязнителей на 3 месяца экспозиции

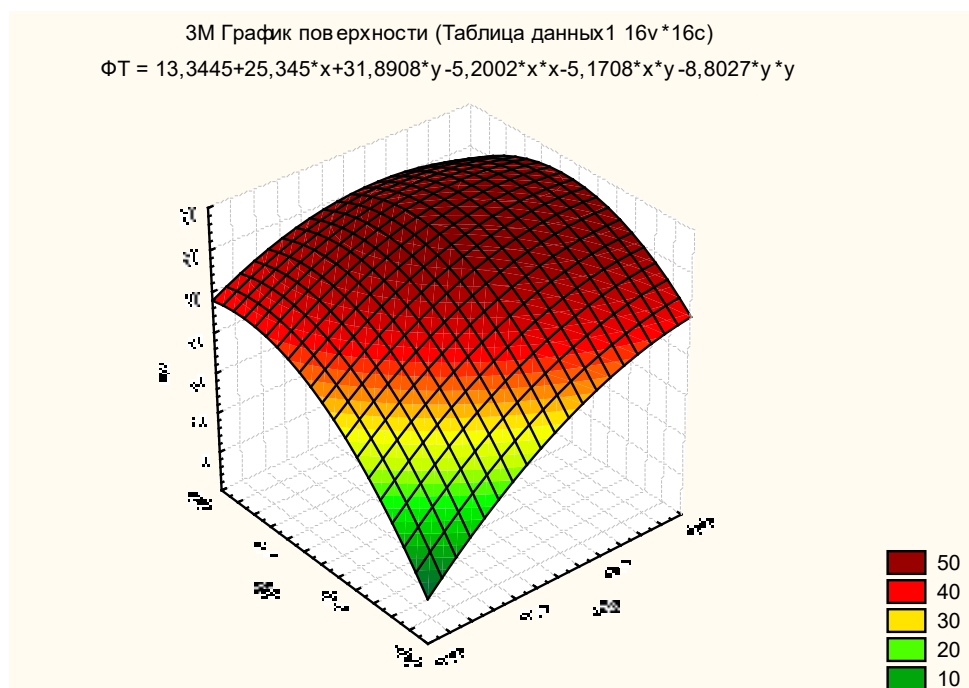


Рисунок 8 – График и зависимость ФТ почвы от совместного влияния НП и ТМ. Время экспозиции – 3 месяца

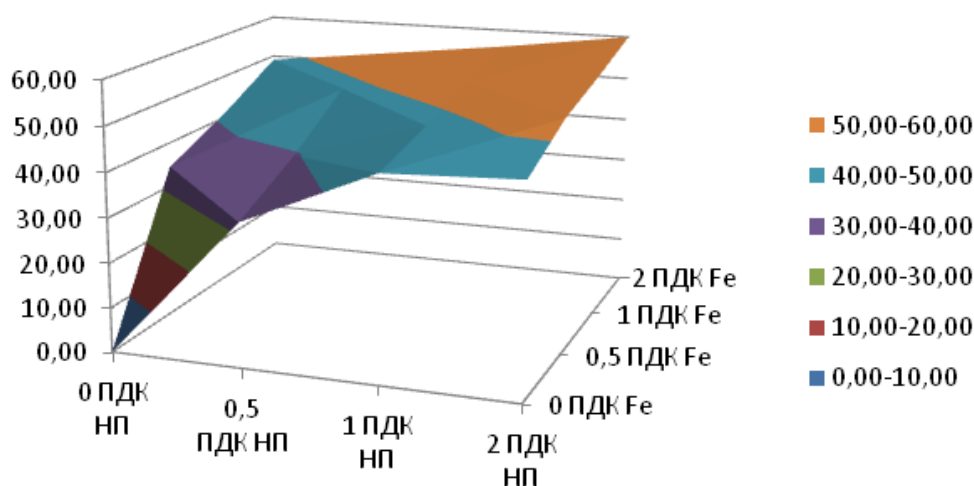


Рисунок 9 – Зависимость ФТ от концентрации загрязнителей на 5 месяцев экспозиции

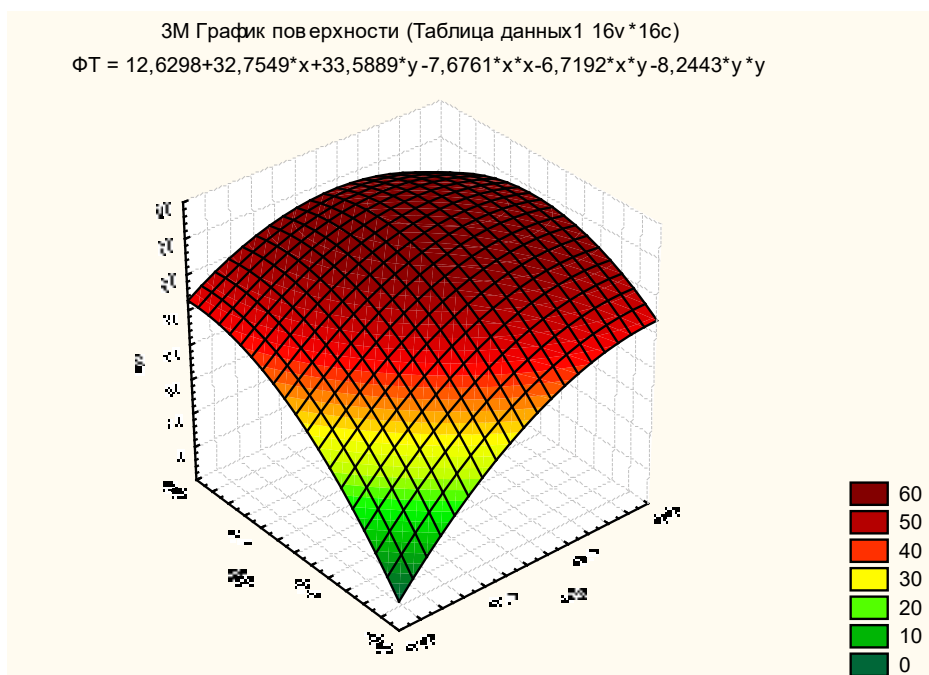


Рисунок 10 – График и зависимость ΦT почвы от совместного влияния НП и ТМ. Время экспозиции – 5 месяцев

Обсуждение. Были получены математические уравнения зависимости ΦT от концентраций поллютантов и от времени экспозиции.

1 месяц экспозиции: $\Phi T = 9.761 + 24.5214 * TM + 25.2796 * НП - 5.2073 * (TM)^2 - 4.5128 * TM * НП - 5.5107 * (НП)^2$

3 месяц экспозиции: $\Phi T = 13.3445 + 25.345 * TM + 31.8908 * НП - 5.2002 * (TM)^2 - 5.1708 * TM * НП - 8.8027 * (НП)^2$

5 месяц экспозиции: $\Phi T = 12.6298 + 32.7549 * TM + 33.5889 * НП - 7.6761 * (TM)^2 - 6.7192 * TM * НП - 8.2443 * (НП)^2$

$R^2 = 0,92$, что свидетельствует о хорошей сходимости результатов.

Во всех опытах прослеживается аналогичная зависимость ΦT от совместного содержания НП и ТМ, что была нами установлена в [7]. Установлено, что время экспозиции поллютантов усиливает ΦT почвы.

Анализ математических уравнений зависимости ΦT от концентрации поллютантов однозначно указывает на рост коэффициентов перед независимыми переменными от времени экспозиции. Для ТМ рост составляет от 17,1087 до 32,7549 за 5 месяцев экспозиции. Для НП рост составляет от 22,2367 до 33,5889 за это же время. Суммарный рост ΦT при совместном действии поллютантов составляет в среднем 10% каждый месяц экспозиции. Данное изменение коэффициентов перед независимыми переменными указывает, что на небольших сроках экспозиции поллютантов наибольшее влияние оказывает содержание НП, а при достижении 5 месяцев контактирования поллютантов вклад в токсическое действия ТМ и НП примерно одинаков. Такая зависимость влияния НП

объясняется гидрофобизацией почвенных агрегатов, что резко ухудшает условия жизнедеятельности почвенных микроорганизмов. Резкое усиление влияния ТМ, а именно, подвижных форм, можно объяснить их влиянием на рост осмотического давления почвенного раствора, особенно, в случае гидрофобизации почвенных агрегатов.

Выводы. Было изучено совместное влияние НП и ТМ на ΦT модельных систем. С помощью программного комплекса *STATISTICA 8.0* определили математические зависимости ΦT от содержания НП и ТМ и разном времени контактирования поллютантов.

Чем больше время контакта, тем выше ΦT . В среднем увеличение времени экспозиции поллютантов на 1 месяц приводит к повышению ΦT на 10%. Чем дольше загрязнители остаются в почве без соответствующих мероприятий по их устранению, тем хуже почва будет отзываться на любые способы рекультивации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Феоктистова И.Д., Сахно О.Н., Журавлева А.Г. Оценка экологического состояния почв урбанизированных территорий, загрязненных нефтепродуктами// Известия Самарского научного центра РАН, 2011. – №1(5) – С. 1233-1239. URL:<https://sciup.org/ocenka-jekologicheskogo-sostojani-ja-pochv-urbanizirovannyh-territorij-148199838?ysclid=licz7egv9g735151637/pdf> (дата обращения 10.04.2023).
2. Ляпина Н.Ш., Мясникова И.Б., Усова Л.С., Колосов Е.С. Определение фитотоксичности почв как метод оценки ее загрязнения// II Всероссийская научно-практическая конференция «Образование России и актуальные вопросы современной науки» МНИЦ ПГАУ. Часть 1. Пенза: РИО ПГАУ. 2019. – С. 257 -260. – Текст: непосредственный.
3. Попова Е.И. Определение фитотоксичности почв города Тобольска методом биотестирования//Современные проблемы науки и образования, 2016. – №4. URL:<https://science-education.ru/ru/article/view?id=24965/pdf> (дата обращения

19.10.2023).

4. Чеснокова С.М., Савельев О.В., Губская С.В. Оценка фитотоксичности и ферментативной активности почв городских ландшафтов, загрязненных тяжелыми металлами (на примере города Судогада) // Успехи современного естествознания, 2016. – №2 – С. 187-192. URL: <https://natural-science.ru/article/view?id=35812/pdf> (дата обращения 19.10.2023).

5. Карпова Е.А., Ермаков А.А., Парубец Ю.С., Голятина С.В. Изменение подвижности меди в дерново-подзолистой почве в течение 3-х лет с момента загрязнения: влияние погодных условий и агрохимических средств // Современные проблемы загрязнения почв: Материалы III Международной научной конференции. (Москва, 24-28 мая 2010 г) М.: МГУ, 2010. – С. 218-222. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20469674&ysclid=liczqkb9si800041842/pdf> (дата обращения 10.04.2023).

6. Михайлова А.А., Попова Л.Ф., Труфанова Н.Е. Степень загрязнения почв нефтепродуктами как показатель воздействия автотранспорта // Экологические проблемы человечества: материалы научно-практической конференции. – М.: 2009. – С. 56-59. URL: <https://rusist.info/book/1652383?ysclid=liczw9wbkj743415516/pdf> (дата обращения: 9.04.2023).

7. Гумерова Р.Х., Селивановская С.Ю., Галицкая П.Ю. Изменение фитотоксичности отхода нефтедобывающего комплекса, содержащего радиоактивные элементы, при их ремедиации // Ученые записки Казанского университета. – 2011. – том 153, кн. 3 – С.127-136. URL: https://www.math-net.ru/php/contents.phtml?wshow=issue&jrnid=uzku&series=0&year=2011&volume=153&issue=3&option_lang=rus/pdf (дата обращения 8.10.2023).

8. Каленков А.Н., Пластинин А.Е. Прогнозирование разливов нефти с судов в Амурском бассейне // Научные проблемы водного транспорта, 2023. – №74 (1) – С. 216-228. URL: <http://journal.vsuwt.ru/index.php/jwt/article/download/341/289/pdf> (дата обращения 20.04.2023).

9. Синдирева А.В., Ловинецкая С.Б. Оценка фитотоксичности почвы, загрязненной нефтепродуктами // Вестника НГАУ (Новосибирский государственный университет). – 2017. – №1. – С. 116-121.

10. Ловинецкая С.Б., Еремеева В.Г., Синдирева А.В. Оценка содержания нефтепродуктов в почвах придорожных территорий г. Омска и Омской области и возможности их ремедиации // Омский Научный Вестник. – 2015. – №138 – С.241-245.

11. Чердакова А.С., Гальченко С.В. Изменение фитотоксичности почв, загрязненных нефтепродуктами, в процессе их микробиологической ремедиации при внесении гуминовых препаратов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2020. – Т. 28 – №4 – С.336-348. URL: <https://journals.rudn.ru/ecology/article/view/27348/pdf> (дата обращения 19.10.2023).

12. Ляпина Н.Ш., Мясникова Т.А., Игнатъева Т.А., Зюнова М.И. Оценка загрязнения нефтепродуктами и катионами железа почв водоохранной зоны правого берега р. волга в пределах г. Нижнего Новгорода // Великие реки 2016: Материалы международной научно-методической конференции. ФГБОУ ВО «ВГУВТ». – 2016. – URL: <http://вфрека-море.рф/2016/PDF/8.pdf> (дата обращения 19.10.2023)

13. Ginocchio R., de la Fuente L.M., Sánchez P., Bustamante E., Silva Y., Urrestarazu P.H. Effect of pH on metal bioavailability and phytotoxicity in agricultural soils spiked with acidic copper – rich mine wastes // Biogeochemistry of trace elements: environmental protection, remediation and human health/ Eds. Y/ G. Zhu, N. Lepp and R. Naidu-Beijing. Tsinghua: University Press, 2007. P. 931-933.

14. Гаврилин И.И., Шиганов АюМю Оценка влияния нефти и нефтепродуктов на состояние растительности по показателям фитотоксичности почв // Системные Методы. Технологии. – 2015. – №3 (27) – С. 144-148. URL: https://brstu.ru/static/unit/journal_smt/docs/number-27/144-148.pdf. (дата обращения 19.10.2023).

15. Wrobel S. Interaction of organic sorbents and liming in remediation of light soil contaminated with copper and zinc // Biogeochemistry of trace elements: environmental protection, remediation and human health/ Eds. Y/ G. Zhu, N. Lepp and R. Naidu-Beijing. Tsinghua: University Press, 2007. P. 604-605.

16. Воеводина Т.С., Русанов А.М., Сулейманов Р.Р. Оценка фитотоксичности и уровня химического загрязнения почв природных территорий г. Оренбурга // Вестник БГАУ. – 2015. – №3 – С.9-13.

17. Верхоменцева Ю.П., Галактионова Л.В. Фитотоксичность почв парков города Оренбурга // Вестник ОГУ. – 2016. – №6(167). – С. 195-198.

18. Карпова Е.А., Ермаков А.А., Парубец Ю.С. Оценка фитотоксичности почвы, экспериментально загрязненной тяжелыми металлами // Теоретическая и прикладная экология. – 2014. – №2. – С.52-56.

19. Попова Е.И. Определение фитотоксичности почв города Тобольска методом биотестирования // Современные проблемы науки и образования. – 2016. – №4 – С.216.

20. Мясникова И.Б., Павлова С.М., Определение совместного влияния тяжелых металлов и нефтепродуктов на фитотоксичность почв / Научные проблемы водного транспорта, 2022, - №72 - С.260-266. – Текст: непосредственный. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodicheskie-podhody-k-opredeleniyu-fitotoksicheskoy-aktivnosti-pochvy-i-pochvennyh-mckroorganizmov> (дата обращения 19.10.2023).

21. Свистова И.Д. Методические подходы к определению фитотоксической активности почвы и почвенных микроорганизмов // Лесотехнический журнал. – 2019. №2(34).

Выражаем благодарность коллегам Пластинину А.Е и Каленкову А.Н., за помощь при работе с программным комплексом STATISTICA 8.0.

Статья поступила в редакцию 16.10.2023

Статья принята к публикации 15.12.2023

УДК 544.653:620.193.013

EDN: HPZJFI

ЭТАНОЛЬНЫЕ ЩЕЛОЧНЫЕ ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ КАК ПРИМЕР ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ЭНЕРГИИ

© Автор(ы) 2023

SPIN: 6169-8590

AuthorID 448228

ORCID: 0000-0002-1313-6826

Researchgate: 6701807193

Scopus ID: 55895350100

ResearcherID: P-7345-2015

ТАРАНЦЕВА Клара Рустемовна, доктор технических наук,
профессор, заведующая кафедрой «Биотехнологии и техносферная безопасность»
Пензенский государственный технологический университет
(440039, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11, E-mail: krtar2018@bk.ru)

SPIN: 5707-0207

AuthorID: 175397

ORCID: 0000-0002-2222-4182

ResearcherID: P-7900-2015

Scopus ID: 6506858044

ТАРАНЦЕВ Константин Валентинович, доктор технических наук,
профессор кафедры «Технология и оборудование машиностроения»
Пензенский государственный университет
(440026, г. Пенза, ул. Красная, 40, E-mail: kvtar@bk.ru)

SPIN: 6008-0461

AuthorID 618066

ORCID: 0000-0001-8386-2201

Scopus ID: 55745721900

ResearcherID: P-6360-2015

КОРОСТЕЛЕВА Анна Владимировна, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Биотехнологии и техносферная безопасность»
Пензенский государственный технологический университет
(440039, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11, E-mail: anna-korostelyova@yandex.ru)

SPIN: 607401

ORCID: 0000-0002-3851-0933

Scopus ID: 56755458400

ResearcherID: GWC-7253-2022

ПОЛЯНСКОВА Екатерина Александровна, кандидат биологических наук,
доцент кафедры «Биотехнологии и техносферная безопасность»
Пензенский государственный технологический университет
(440039, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11, E-mail: polyanka05@mail.ru)

Аннотация. Применение экологически безопасных технологий является одним из основных условий обеспечения экологической безопасности как на локальном, так и глобальном уровнях. «Зеленая энергетика» на основе возобновляемых источников энергии является классическим примером таких технологий. Известные альтернативные источники энергии, такие как солнце и ветер сильно зависят от географии региона и не являются постоянными, поэтому необходима разработка технологий преобразования и хранения энергии следующего поколения, позволяющих получать независимые источники энергии со стабильными характеристиками. К таким технологиям относится технология прямого электрохимического преобразования реакции окисления топлива, в частности спирта, минуя процессы горения. Прямое окисление этанола в топливном элементе, позволяет обеспечить замыкание экологически чистого цикла трансформации энергии в природном масштабе, так как этанол, может воспроизводиться в биосистемах в неограниченных количествах. Спиртовые топливные элементы могут использоваться в мобильных приложениях и в критически важных инфраструктурах сетей передачи данных, а также обеспечивать резервное электропитание ответственных потребителей и энергоснабжение удаленных и изолированных территорий. Надежная работа спиртового топливного элемента зависит от правильного выбора катализаторов и состава топливной смеси. В данной работе представлены принципы и подходы, позволяющие получить экологически безопасные источники энергии на основе этанола, как возобновляемого топлива. Рассмотрена стратегия создания эффективных катализаторов для этанольных топливных элементов и проанализированы основные тренды. Авторами представлены результаты собственных исследований в области создания безмембранных щелочных этанольных топливных элементов и разработанных для них биметаллических и три-

металлических катализаторах на основе металлических пен. Показано, что предложенные решения позволят повысить мощность спиртового топливного элемента, снизить его стоимость и вплотную приблизиться к их промышленному освоению, тем самым повысить экологическую и энергетическую безопасность различных объектов экономики.

Ключевые слова: экологически безопасные технологии, системы накопления энергии, топливные элементы, безмембранные, щелочные, этанол, катализаторы, металлические пены.

ETHANOL ALKALI FUEL CELLS AS AN EXAMPLE OF ENVIRONMENTALLY SAFE ENERGY PRODUCTION TECHNOLOGY

© The Author(s) 2023

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)

TARANTSEV Konstantin Valentinovich, doctor of technical sciences,
professor of the Department of Technology and Equipment of Mechanical Engineering
Penza State University

(440026, Penza, Krasnaya st., 40, E-mail: kvtar@bk.ru)

KOROSTELEVA Anna Vladimirovna, candidate of technical sciences,
associate professor of the Department of Biotechnology and Technosphere Safety
Penza State Technological University

(440039, Penza, Baidukova proezd/Gagarina st., 1a/11, E-mail: anna-korostelyova@yandex.ru)

POLYANSKOVA Ekaterina Alexandrovna, candidate of biological sciences,
associate professor of the Department of Biotechnology and Technosphere Safety
Penza State Technological University

(440039, Penza, Baidukova proezd/Gagarina st., 1a/11, E-mail: polyanka05@mail.ru)

Abstract. The use of environmentally friendly technologies is one of the main conditions for ensuring environmental safety both at the local and global levels. Green energy based on renewable energy sources is a classic example of such technologies. Known alternative energy sources, such as the sun and wind, are highly dependent on the geography of the region and are not constant, therefore it is necessary to develop next-generation energy conversion and storage technologies that allow obtaining independent energy sources with stable characteristics. Such technologies include the technology of direct electrochemical conversion of the oxidation reaction of fuel, in particular alcohol, bypassing combustion processes. Direct oxidation of ethanol in a fuel cell allows for the closure of an environmentally friendly cycle of energy transformation on a natural scale, since ethanol can be reproduced in biological systems in unlimited quantities. Alcohol fuel cells can be used in mobile applications, in critical infrastructures of data transmission networks, and also make it possible to provide backup power to critical consumers, power supply to remote and isolated areas, etc. Reliable operation of an alcohol fuel cell depends on the correct choice of catalysts and the composition of the fuel mixture. This paper presents principles and approaches that make it possible to obtain environmentally friendly energy sources based on ethanol as a renewable fuel. The strategy for creating effective catalysts for ethanol fuel cells is considered and the main trends are analyzed. The authors present the results of their own research in the field of creating membrane-free alkaline ethanol fuel cells, bimetallic and trimetallic catalysts developed for them based on metal foams. It is shown that the proposed solutions will increase the power of the alcohol fuel cell, reduce its cost and come close to their industrial development, thereby increasing the environmental and energy safety of various economic facilities.

Keywords: environmentally friendly technologies, energy storage systems, fuel cells, membraneless, alkaline, ethanol, catalysts, metal foams.

Для цитирования: Таранцева К.Р. Этанольные щелочные топливные элементы как пример экологически безопасной технологии получения энергии / К.Р. Таранцева, К.В. Таранцев, А.В. Коростелева, Е.А. Полянская // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 12. – № 4(64). – С. 279-287. – EDN: HPZJFI.

Введение. Применение экологически безопасных технологий является одним из основных направлений обеспечения экологической безопасности как на локальном, так и глобальном уровнях. «Зеленая энергетика» на основе возобновляемых источников энергии является примером одной из таких технологий [1], так как традиционная энергетика, основанная на сжигании полезных ископаемых, приводит к попаданию в атмосферу оксидов

углерода CO_x , серы SO_x , азота NO_x , ванадия V_2O_5 , фтористых и других соединений, наносящих огромный вред окружающей среде и человеку.

Известные альтернативные источники энергии, такие как солнце и ветер сильно зависят от географии региона и не являются, постоянными, поэтому необходима разработка технологий преобразования и хранения энергии следующего поколения, позволяющих получать независимые источники энергии со стабиль-

ными характеристиками.

К таким технологиям относится технология прямого электрохимического преобразования реакции окисления топлива, в частности спирта, минуя процессы горения. Основными спиртами, используемыми в спиртовых топливных элементах, являются метанол и этанол. Метанол является не возобновляемым, летучим и легковоспламеняющимся веществом; кроме того, он обладает высокой токсичностью. Этанол, по сравнению с метанолом менее токсичен и имеет более высокую удельную энергию $7,4 \text{ кВт}\cdot\text{ч}\cdot\text{кг}^{-1}$ и $6,1 \text{ кВт}\cdot\text{ч}\cdot\text{кг}^{-1}$, соответственно. Этанол является источником возобновляемой энергии, поскольку его можно производить из растительных отходов путем сбраживания. Прямое окисление этанола в топливном элементе, позволяет обеспечить замыкание экологически чистого цикла трансформации энергии в природном масштабе, т.к. этанол, может воспроизводиться в биосистемах в неограниченных количествах. Продуктами окисления этанола являются CO_2 и H_2O . Поэтому спиртовые топливные элементы рассматривают в последнее время как перспективный и экологически безопасный источник бесперебойного питания с диапазоном мощностей от долей Вт до 200 Вт для различных устройств [2].

Спиртовые топливные элементы могут использоваться в мобильных приложениях и в критически важных инфраструктурах сетей передачи данных, обеспечивать резервное электропитание ответственных потребителей и энергоснабжение удаленных и изолированных территорий и др. [3]. В связи с этим, повсеместно ведется активная разработка спиртовых топливных элементов, выбор соответствующих катализаторов и условий проведения процесса.

С учетом того, что в настоящее время во всем мире остро стоит вопрос глобальной энергетической безопасности и создания устойчивых технологий, основанных на собственных ресурсах, выбор материалов для катализаторов топливных элементов необходимо проводить на основе отечественного сырья, для исключения геополитических рисков. Большинство известных катализаторов для окисления этилового спирта основаны на металлах платиновой группы. Их дороговизна и дефицитность приводят к необходимости создания катализаторов на основе других материалов, в частности, переходных металлов [4-6], в большом количестве находящихся в земной коре на территории нашей страны [7,8]. Решение обозначенных проблем позволит вплотную приблизиться к промышленному производству систем накопления энергии нового поколения и повысить экологическую и энергетическую безопасность различных объектов экономики.

В данной работе мы рассматриваем принципы и подходы, позволяющие получить экологически безопасные источники энергии на основе этанола, как возобновляемого топлива. Предлагаем стратегию создания эффективных катализаторов для этанольных топливных элементов на неплатиновой основе и

анализируем основные тренды. Представляем результаты собственных исследований в области создания безмембранных щелочных этанольных топливных элементов, разработанных для них биметаллических и триметаллических катализаторах на основе металлических пен.

В основе построения чистой энергетики лежит электрокатализ, т.е. электрохимическое преобразование и хранение энергии. Однако, большинство процессов электрокатализа, таких как реакция выделения кислорода, реакция восстановления кислорода, реакция окисления спирта и др. являются кинетически медленными и требуют эффективных катализаторов. Двумя основными принципами создания эффективных катализаторов являются увеличение количества активных центров за счет создания определенной гетерогенной текстуры катализатора, и повышение собственной активности каждого активного центра путем настройки электронной структуры.

Анализ современных тенденций в области разработки катализаторов для окисления этанола в щелочных топливных элементах показал, что во всем мире наблюдается интерес к биметаллическим и триметаллическим катализаторам из металлов неплатиновой группы, оксидов и гидроксидов металлов с высокой селективностью разрыва связей C-C и C-H . В этой связи, большую перспективу имеют металлы переходной группы, и прежде всего никель, серебро, кобальт, железо, медь и др. Легирование катализатора данными металлами, а также покрытие его поверхности оксидами и гидроксидами этих металлов позволяет существенно улучшить его каталитические свойства.

Нанесение катализаторов на поверхность различных металлических пен, представляющих собой трехмерные (3D) материалы с открытыми порами, позволяет в десятки раз увеличить их активность [9]. Высокая удельная поверхность и механическая прочность металлических пен позволяют использовать их в качестве носителей (подложек) для нанесения каталитически активных материалов без применения связующих материалов. Высокая пористость и взаимосвязанные микроканалы улучшают капиллярную смачиваемость [10], в результате чего водные электролиты лучше перемещаются по порам поверхности оксида металла, чем по металлической поверхности [11]. Поэтому применение металлических пен в качестве носителей является перспективной стратегией получения эффективных катализаторов для экологически безопасных систем накопления энергии нового поколения [6].

Использование катализаторов для спиртовых топливных элементов на основе металлов неплатиновой группы становится возможным лишь при использовании щелочных сред. Установлено, что в щелочных средах, для реакции окисления спирта становится возможным использование в качестве катализаторов таких металлов как серебро, никель, олово и их двойных и тройных сплавов, вследствие

более быстрой кинетики и малых перенапряжений [12]. Электроосаждение на металлические пены таких металлов как никель, серебро, олово позволяет повысить активность реакций за счет возникновения синергетического эффекта [5, 13].

В связи с вышеперечисленным, на наш взгляд для реакции окисления этанола перспективными являются катализаторы, осажденные на вспененные металлические подложки с каталитическим слоем из серебра, никеля и олова [13].

Никель широко используется в качестве электрокатализатора и проявляет отличные каталитические свойства в отношении окисления спиртов [14]. Окисление никеля до гидроксида никеля в щелочной среде увеличивает адсорбцию частиц OH_{ads} и повышает общую скорость реакции.

Серебро является перспективным катализатором для окисления этанола в щелочных средах. Дополнительно увеличить активность серебряного катализатора можно за счет создания более гетерогенной поверхности [5]. Палладий (*Pd*) широко применяется в качестве катализатора для восстановления кислорода. Для уменьшения эффекта отравления катализатора в сплавы *Pd* включают *Ni*, *Ru*, *Bi* и др. Для улучшения свойств катализатора в качестве подложки используют подложки из вспененного металла и др. [15]. К преимуществам этого типа катализаторов относятся сниженная стоимость и повышенная каталитическая активность и стабильность.

Легирование увеличивает количество активных центров для прохождения реакции [16]. При этом активными центрами являются ионы с высокой степенью окисления, например, железо (III и IV), кобальт (III и IV). Введение железа *Fe*, *Co* в состав катализатора способствует снижению перенапряжения реакции восстановления кислорода и смещению начала этой реакции в отрицательную область потенциалов, что благоприятно сказывается на каталитической активности катода.

Легирование оловом [17] может вызвать электронные и синергетические эффекты, ослабляющие адсорбцию *CO* на поверхности катализатора и способствующие их дальнейшей трансформации. Обнаружено, что присутствие олова приводит к увеличению плотности тока при электроокислении этанола при оптимальном содержании 20% *Sn* в сплаве. По мнению авторов, чистое олово (нелегированное) обеспечивает адсорбцию гидроксильных группы при низких потенциалах. Введение никеля, наряду с оловом, и других металлов в состав катализатора, позволяет снизить применение палладия в катализаторах для окисления этанола [18, 19].

Поэтому сплавы на основе палладия, никеля, кобальта и железа можно рассматривать в качестве перспективных недорогих катодных катализаторов для проведения реакций восстановления кислорода в сильнощелочных средах. Поскольку в реакции восстановления кислорода принимает участие лишь поверхностный слой катализатора, появляется воз-

можность применения гальванических покрытий из этих сплавов на поверхности токопроводящей подложки, для снижения стоимости катализатора, и топливного элемента в целом,

Надежная работа спиртового топливного элемента зависит не только от правильного выбора катализаторов, но и от состава топливной смеси, прежде всего, концентрации этанола, содержания воды и *pH*. Исследования показали, что при превышении водородного показателя раствора выше $10pH$ активность окисления этанола значительно возрастает. Для окисления *CO* и *CH₄* необходимы адсорбированные частицы *OH*-, поэтому высокое перенапряжение их образования или замедленная стадия адсорбции ограничивают скорость реакции. Сделан вывод, что идеальный катализатор должен обладать способностью слабо адсорбировать большинство промежуточных соединений, но сильнее всего *OH*-. Адсорбция его очень важна, поскольку при окислении этанола *OH*- действует как центр согласованного пути дегидрирования.

В щелочной среде, диссоциативная адсорбция этанола протекает довольно быстро, и этап, определяющий скорость реакции, это удаление адсорбированных частиц, адсорбированным гидроксидом. При более высоких потенциалах на кинетику влияет не только электроадсорбция ионов *OH*-, но также образование неактивного поверхностного оксидного слоя. Начальной стадией разрыва в сильнощелочных средах является разрыв связи *O-H*. Возможности повышения эффективности окисления этанола в щелочных условиях все еще раскрыты не до конца, так как подробная информация о продуктах реакции приведена в ограниченном числе исследований [20].

Выбор оптимального состава и условий проведения процесса окисления этанола имеет решающее значение для получения высокой плотности тока и предотвращения потерь топлива из-за неполного прохождения реакции. Слишком высокая концентрация этанола на аноде приведет к уменьшению покрытия его *OH*-, и соответственно, к уменьшению скорости окисления *CO* до *CO₂* и отравлению анода. Напротив, слишком низкая концентрация этанола может привести не только к уменьшению оптимального тока.

Кроме концентрации этанола, необходим выбор оптимального содержания воды в электролите. Вода образуется на аноде и потребляется на катоде, что способствует переходу воды от анода к катоду. Это приводит к увеличению ионной проводимости электролита. Однако, слишком большое количество воды может привести к затоплению катода и затруднить перенос кислорода. Напротив, малое количество воды может способствовать переносу кислорода, но может привести к большим потерям при активации катода.

Таким образом, в области разработки катализаторов для спиртовых топливных элементов и создания оптимальных топливных смесей еще много нерешенных задач, ограничивающих их практическое применение. Поэтому исследования в данном

направлении актуальны.

Ранее нами был предложен этанольный безмембранный топливный элемент и выбрана для него сильнощелочная двухфазная система этанол-электролит-вода ($EtOH + KOH + H_2O$), удовлетворяющая вышеуказанным требованиям, предъявляемым к топливным смесям [21]. Данный элемент обладает рядом неоспоримых преимуществ по сравнению с мембранными и проточными безмембранными топливными элементами. От первых, его выгодно отличает отсутствие мембраны, которые достаточно дороги и имеют ограниченный срок службы. От вторых - простота конструкции и обслуживания, отсутствие необходимости вспомогательного оборудования и приборов и устройств для подачи и перекачивания топлива и окислителя, возможность иметь большие размеры и высокую мощность. Кроме того, использование сильнощелочной среды в предложенном топливном элементе позволяет использовать для прохождения реакций восстановления кислорода на катоде и реакции выделения кислорода на аноде катализаторы из неблагородных металлов, благодаря улучшенной кинетики реакции и более низкой, по сравнению с кислотой, коррозионной активностью щелочной среды. Ввиду новизны предложенного технического решения, ранее исследования в таких топливных смесях не проводились. Ниже представлены результаты наших исследований в области создания безмембранных щелочных этанольных топливных элементов и разработанных для них катализаторов, с учетом последних достижений и трендов в этой области.

Методология. В соответствии с поставленными целями с учетом последних достижений в области разработки наноструктурированных биметаллических и триметаллических катализаторов на металлических носителях для окисления спиртов в щелочных условиях нами были проведены исследования по определению каталитической активности биметаллических катализаторов на основе: никелевой, оловянной и серебряной пены, а также медных подложек с нанесенными на них гальваническими покрытиями палладия, никеля, кобальта и железа.

Для изучения процессов массопереноса в топливных элементах на основе двух несмешивающихся жидкостей использовали циклическую вольтамперометрию и металлографическую микроскопию.

Циклическая вольтамперометрия является высокоинформативным методом изучения окислительно-восстановительных процессов в системе. Она позволяет определить стандартные константы скорости электронного переноса, рассчитать коэффициенты диффузии, получить информацию, о лимитирующих стадиях процесса и др. [22]. Для проведения исследований использовали потенциостат/гальваностат П-45Х с программным обеспечением ЕС-8 и электрохимическую ячейку с трехэлектродной системой. В качестве электрода сравнения использовали насыщенный хлорсеребряный электрод, а в качестве вспомогательного - платиновый.

Исследования проводились в системе несмешивающихся жидкостей $EtOH + KOH + H_2O$ ($pH=13,1$), выбранной нами в качестве топливной смеси для безмембранных топливных элементов. Верхняя фаза в этой системе жидкостей – водные растворы этанола («спиртовой слой»), нижняя фаза – водные растворы гидроксида калия КОН со следами этанола («солевой слой»). Ранее для этих систем этанол-электролит-вода были экспериментально получены бинаоды и определены условия их разделения [21].

В качестве носителя (подложки) катализатора использовали металлическую медь Mo с содержанием меди не менее 99,9%. Размеры электродов $10 \times 10 \times 1,5$ мм. Изучали анодные и катодные катализаторы. В качестве анодных катализаторов исследовали серебряные (Ag_{foam}) и никелевые (Ni_{foam}) пены толщиной 200 мкм. Методика нанесения металлических пен на поверхность медной подложки подробно описана в наших работах [23-25]. В качестве катодных катализаторов исследовали гладкие гальванические покрытия толщиной 12 мкм, полученные нанесением слоя олова на подслои из палладия и железа $Sn @ Pd_{90}Fe_{10}$ и никеля, и кобальта, нанесенных на подслои палладия и железа $Ni_{80}Co_{20} @ Pd_{90}Fe_{10}$.

Для анализа поверхности рабочих электродов использовали металлографический микроскоп МЕТАМ-III с цифровой видеокамерой и программным обеспечением.

Результаты и обсуждение. На рисунке 1 представлены фото и 3D-изображения полученных катализаторов.

На рисунках 2, 3, 4 и 5 представлены циклические вольтамперные кривые анодных и катодных катализаторов в спиртовом и солевом слоях, соответственно.

На циклических вольтамперных кривых анодных катализаторов Ag_{foam}/Cu (рис. 2) и Ni_{foam}/Cu (рис.3) видны анодные пики при потенциалах $-330 \div -350$ мВ, с максимальной плотностью тока 75 mA/cm^2 и 20 mA/cm^2 , соответственно. Эти потенциалы соответствуют началу окисления этанола на исследуемых анодных катализаторах.

Судя по плотности тока можно судить о том, что окисление этанола на серебряной пене идет более интенсивно. Полученные результаты исследований согласуются с данными, имеющимися в литературе [26]. Полученные данные не противоречат имеющимся данным. Электрохимическое окисление серебра в щелочных средах протекает следующим образом. В начале образуется адсорбционный комплекс $Ag(OH)_{ads}$, ему соответствует анодный пик при -600 мВ. При дальнейшей анодной поляризации образуется Ag_2O и происходит его окисление до AgO , ему соответствует второй пик при -350 мВ (рис.2).

При дальнейшем повышении потенциала AgO окисляется Ag_2O_3 , третий пик при 80 мВ. Наконец, начиная с 150 мВ начинается выделение кислорода. При смене направления развертки первый пик на

катодной кривой при -1000 мВ соответствует пику восстановления оксида серебра Ag_2O до Ag , второй и третий пики при -580 мВ и 820 мВ восстановлению кислорода и водорода. Известно, что восстановление кислорода на серебре может проходить по пути $2e^- + 2e^-$ через образование перекиси водорода, или по пути $4e^-$ через образование кислорода, или обоими путями вместе. Считается, что путь $4e^-$ более

предпочтителен, так не снижает эффективность работы элемента и является более щадящим для материала электрода. В нашем случае, для анодного катализатора Ag_{foam}/Cu наблюдается случай $2e^- + 2e^-$.

На циклической вольтамперной кривой катодного катализатора Ni_{foam}/Cu (рис. 3) виден один анодный пик при потенциале -330 мВ и два катодных пика при -30 мВ и -670 мВ.

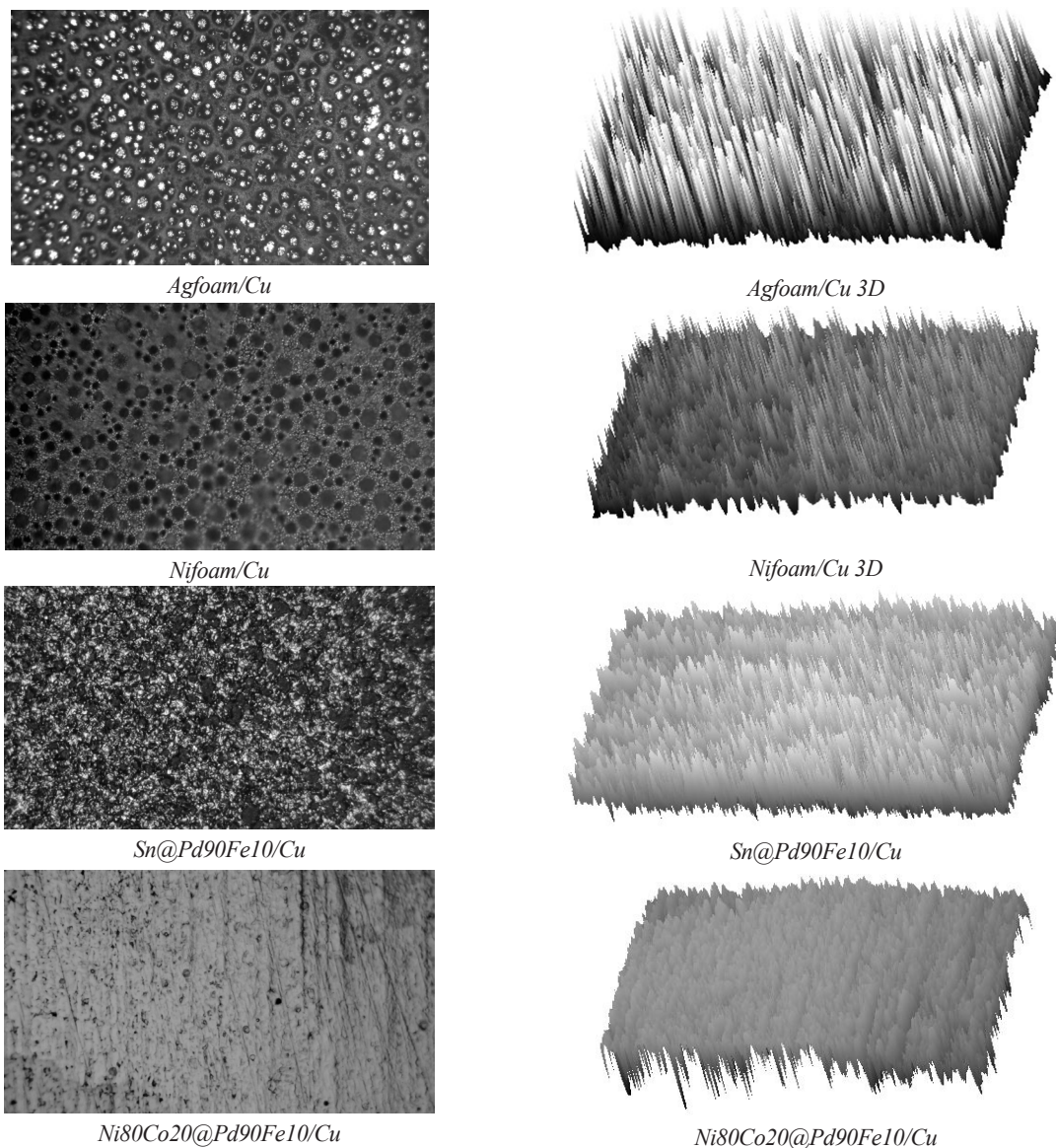


Рисунок 1 – Фото (увеличение $\times 50$) и 3D-изображения анодных и катодных катализаторов

Согласно диаграмме Пурбэ [27] в исследуемой области потенциалов в водных средах на никеле возможно протекание реакций образования гидроксидов и оксидов никеля. С учетом этого можно сделать вывод, что наличие анодного пика связано с адсорбцией и последующим образованием гидроксида никеля на поверхности электрода ($Ni(OH)_2$) и началом окисления этанола. Резкий рост тока начиная с 100 мВ связан с процессом перехода гидрооксидной пленки в оксидную, с и выделения кислорода. Первый катодный пик при -30 мВ связан с восстановлением никеля до Ni^0 . Второй катодный

пик при -670 мВ связан с восстановлением кислорода по пути $4e^-$, следовательно, можно ожидать, что данный анодный катализатор, будет более долговечным.

Сравнение циклических вольтамперных кривых катодных катализаторов $Ni_{80}Co_{20}@Pd_{90}Fe_{10}/Cu$ (рис.4) и $SnPd_{90}Fe_{10}/Cu$ (рис.5), показывает, что потенциалы коррозии обоих катализаторов находятся в области пассивности, причем этом для катализатора $SnPd_{90}Fe_{10}/Cu$ он находится в более отрицательной области. Можно ожидать, что благодаря этому, применение данного катодного катализатора

позволит достичь большей разности потенциалов в топливном элементе.

Для проверки этого, были собраны безмембранные топливные элементы из следующих пар катализаторов: 1) катод $Ni_{80}Co_{20}@Pd_{90}Fe_{10}$ и анод Ag_{foam}/Cu ; 2) катод $Sn@Pd_{90}Fe_{10}/Cu$ и анод Ni_{foam}/Cu и предложенной нами топливной смесью $EtOH + KOH + H_2O$ ($pH=13,1$) [21]. Выдержка данных топливных элементов в течении 90 суток при комнатной тем-

пературе (рис.6 и 7), показала, что наибольшая разность потенциалов 900 мВ наблюдалась в топливном элементе с катодом $Sn@Pd_{90}Fe_{10}/Cu$ и анодом Ni_{foam}/Cu (рис. 7). В топливном элементе с катодом $Ni_{80}Co_{20}@Pd_{90}Fe_{10}$ и анодом Ag_{foam}/Cu изначальная разность потенциалов составила 700 мВ, со временем она уменьшилась до 550 мВ, что связано, по-видимому, с недостаточной устойчивостью анода и его растворением при длительной выдержке.

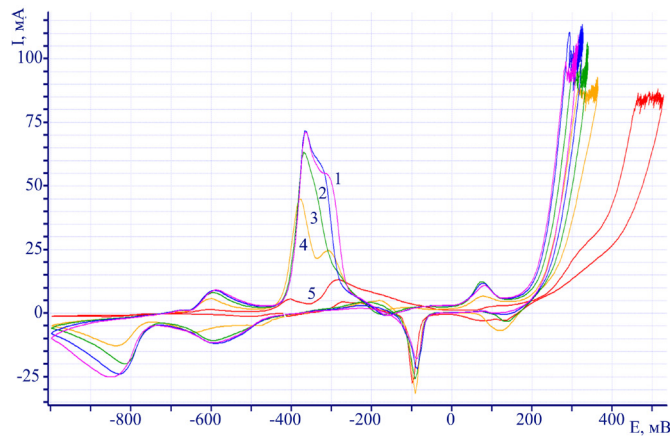


Рисунок 2 – Циклические вольтамперные кривые анодного катализатора Ag_{foam}/Cu в спиртовом слое при скоростях развертки потенциала: 10 мВ/с (1); 25 мВ/с (2); 50 мВ/с (3) и 100 мВ/с (4)

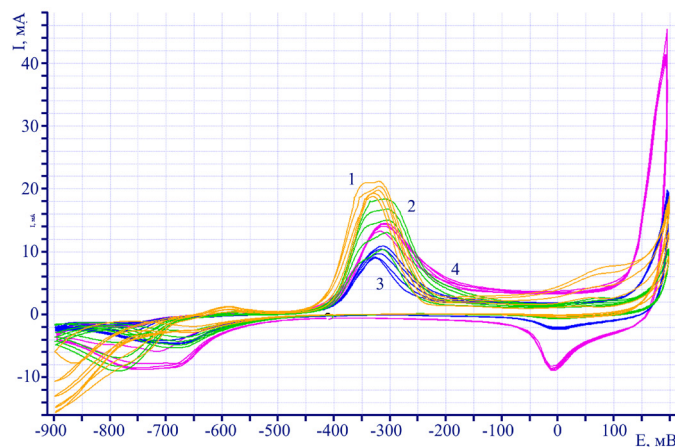


Рисунок 3 – Циклические вольтамперные кривые анодного катализатора Ni_{foam}/Cu в спиртовом слое электролита при скоростях развертки потенциала: 10 мВ/с (1); 25 мВ/с (2); 50 мВ/с (3) и 100 мВ/с (4)

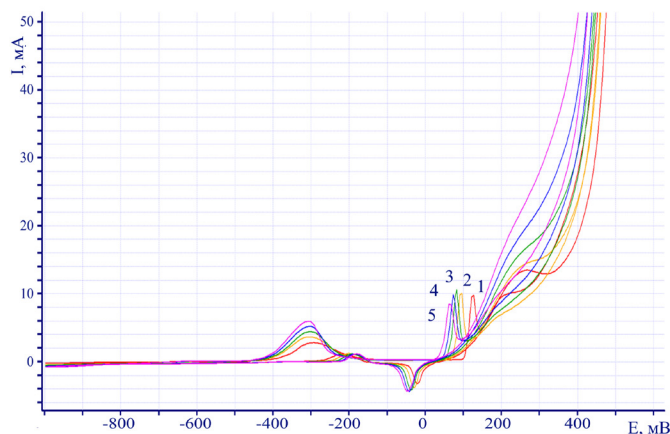


Рисунок 4 – Циклические вольтамперные кривые катодного катализатора $Ni_{80}Co_{20}@Pd_{90}Fe_{10}/Cu$ в солевом слое электролита при скоростях развертки потенциала: 10 мВ/с (1); 25 мВ/с (2); 50 мВ/с (3) и 100 мВ/с (4)

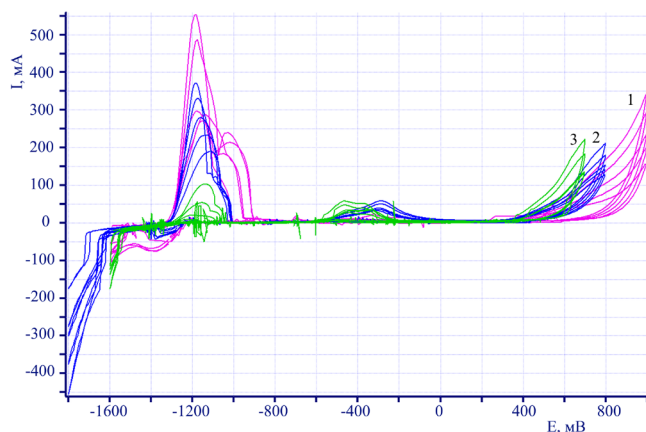


Рисунок 5 – Циклические вольтамперные кривые катодного катализатора SnPd90Fe10/Cu в солевом слое при скоростях развертки потенциала: 10 мВ/с (1); 25 мВ/с (2); 50 мВ/с (3) и 100 мВ/с (4).

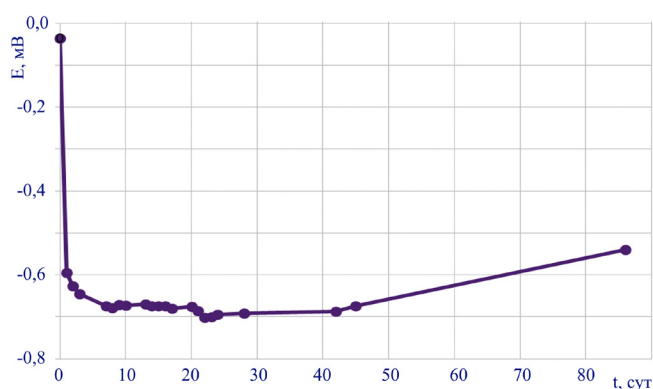


Рисунок 6 – Разность потенциалов в топливном элементе с катодом Ni80Co20@Pd90Fe10 и анодом Agfoam/Cu при длительной выдержке



Рисунок 7 – Разность потенциалов в топливном элементе с катодом Sn@Pd90Fe10/Cu и анодом Nifoam/Cu при длительной выдержке

Выводы. Результаты собственных исследований в области создания безмембранных щелочных этанольных топливных элементов и разработанных для них биметаллических и триметаллических катализаторов на основе металлических пен, показали, что использование катодных трикатализаторов Sn@Pd₉₀Fe₁₀ на медной подложке и никелевой пены на медной подложке Ni_{foam}, в качестве анодного катализатора позволяет достичь стабильной разности потенциалов в предложенном безмембранном топливном элементе 900 мВ при длительной выдержке. Разработанные катализаторы позволяют суще-

ственно снизить стоимость топливного элемента по сравнению катализаторами на основе платины, применяемыми в настоящее время, при сопоставимой разности потенциалов. Предложенные решения позволяют вплотную приблизиться к промышленному освоению этанольных спиртовых топливных элементов, тем самым повысить экологическую и энергетическую безопасность различных объектов экономики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Сарпеков М.Н. Экологическая безопасность как важнейший аспект обеспечения прав и свобод личности,

- общества и государства // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 10 (1). С. 164-168.
2. Тарасевич М.Р., Кузов А.В. Топливные элементы прямого окисления спиртов. International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology. 2010. V. 87 (7). P.86-108.
3. Кучеров Ю.Н., Иванов А.В., Корен Д.А. и др. Развитие технологий активного потребителя и их интеграция в электрическую сеть общего пользования // Энергетическая политика. 2018. № 5. С.73-79.
4. Yu M., Budiyo E., Tiystiz H. Principles of Water Electrolysis and Recent Progress in Cobalt-, Nickel-, and Iron-Based Oxides for the Oxygen Evolution Reaction // Angewandte Chemie International Edition. 2022. № 67. P. 202103824.
5. Zheng Y., Wan X., Cheng X. [et al.]. Advanced Catalytic Materials for Ethanol Oxidation in Direct Ethanol Fuel Cells // Catalysts. 2020. № 10 (2). P. 166.
6. Kaedi F., Vahabi A., Yavari Z. [et al.]. Transition metal oxides synthesized by self-sustaining combustion method as an accelerator to desorb produced intermediates during ethanol oxidation // Results in Chemistry. 2023. № 5. P. 194.
7. Федосюк В. На пути к пост-литиевым технологиям // Наука и инновации. 2022. №6 (244). С.52-57.
8. Гурская Л.И., Додин Д.А. Минеральные ресурсы платиновых металлов России: перспективы расширения // Региональная геология и металлогения. 2015. № 64. С. 84-93.
9. Zheng W., Lee L., Liu M. Best Practices in Using Foam-Type Electrodes for Electrocatalytic Performance Benchmark // ACS Energy Letter. 2020. 5. P. 3260-3264.
10. Shum C.; Rosengarten G.; Zhu Y. Enhancing Wicking Microflows in Metallic Foams // Microfluidics and Nanofluidics. 2017. 21 (12). P. 177-184.
11. Yang H., Yang Y., Ma B. [et al.]. Experimental Study on Capillary Microflows in High Porosity Open-Cell Metal Foams // Micromachines. 2022. 13 (12). P. 2052.
12. Silva J.C., Lopes T., Neto A. [et al.]. Electrocatalysts for Direct Ethanol Fuel Cells // MDPI, Chapter, 2018.
13. Yaqoob L., Noor T., Iqbal N. A comprehensive and critical review of the recent progress in electrocatalysts for the ethanol oxidation reaction // RSC Advance. 2021. 11. P. 16768.
14. Pang J., Yin M., Wu P. [et al.]. Advances in catalytic dehydrogenation of ethanol to acetaldehyde // Green Chemistry. 2021. doi: 10.1039/D1GC02799A
15. Tan J.L., De Jesus A.M., Chua S.L. [et al.]. Preparation and characterization of palladium-nickel on graphene oxide support as anode catalyst for alkaline direct ethanol fuel cell // Applied Catalysis A: General. 2017. № 531. P. 29-35.
16. Zhang M., Li X., Zhao J. [et al.]. Surface/interface engineering of noble metals and transition metal-based compounds for electro catalytic applications // Journal of Materials Science and Technology. 2020. № 38. P. 221-236.
17. Lovic J., Pantovic S., Rakocevic L. [et al.]. A Novel Two-Step Electrochemical Deposition Method for Sn-Pd Electrocatalyst Synthesis for a Potential Application in Direct Ethanol Fuel Cells // Processes. 2023. № 11. P. 1202.
18. Lovic J., Jovic V. Electrodeposited Pd and PdNi coatings as electrodes for the electrochemical oxidation of ethanol in alkaline media // Solid State Electrochemistry. 2017. № 22. P. 2433-2441.
19. Zhang Y., Yi Q., Deng Z. [et al.]. Excellent electroactivity of ternary Pd-Ag-Sn nanocatalysts for ethanol oxidation // Catalysis Letter. 2018. № 148. P. 1190-1201.
20. Monyoncho E.A., Woo T.K., Baranova E.A. Ethanol electrooxidation reaction in alkaline media for direct ethanol fuel cells // Electrochemistry. 2018. 15. P. 1-57.
21. Tarantseva K., Yakhkind M., Mishra A. [et al.]. Systems of two immiscible liquids for a new type of membraneless fuel cells using renewable fuel // E3S Web of Conferences. 2020. 161. 01062.
22. Aristov N., Habekost A. Cyclic Voltammetry - A Versatile Electrochemical Method Investigating Electron Transfer Processes // World Journal of Chemical Education. 2015. V.3. № 5. P.115-119.
23. Tarantseva K., Korostelyova A., Tarantsev K. [et al.]. Study of the catalytic activity of copper substrates coated with gold and silver foam in alcohol-alkaline media // Journal of Physics Conference Series. 2023. Vol. 2550. P. 012002.
24. Tarantseva K., Korostelyova A., Tarantsev K. Catalytic Activity of Copper Electrodes Coated with Nickel Foam, Iron and Cobalt Oxides and Hydroxides in Highly Alkaline Alcoholic Media // Third International Conference on Advances in Electrical, Computing, Communication and Sustainable Technologies (ICAECT). Bhillai. India. 2023. P. 1-5, doi: 10.1109/ICAECT57570.2023.10117976
25. Tarantseva K., Korosteleva A., Tarantsev K. Catalytic activity of bimetallic catalysts with a heterogeneous structure based on copper foam, graphene oxide, and silver in alkaline alcohol electrolytes // AIP Conf. Proc. 2023. Vol. 2911. P. 020019.
26. Linge J., Kozlova J., Erikson H. [et al.]. Oxygen reduction on electrodeposited silver alkaline solution // Journal of Solid State Electrochemistry. 2018. № 22(1). P. 1-9.
27. Takeno N. Atlas of Eh-pH diagrams. Inter comparison of thermodynamic databases. Geological Survey of Japan Open File Report. 2005. № 419.

«Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01422, <https://rscf.ru/project/22-29-01422/>: Разработка безмембранных щелочных спиртовых топливных элементов на основе двух несмешивающихся жидкостей с использованием наноструктурированных биметаллических и триметаллических катализаторов на металлических и углеродных носителях».

Статья поступила в редакцию 28.10.2023

Статья принята к публикации 15.12.2023

УДК 614.844.5

EDN: IPTSGS

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ВОДЫ НА ПОЖАРНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ВОЗДУШНО-МЕХАНИЧЕСКОЙ ПЕНЫ

© Автор(ы) 2023

SPIN: 3699-1576

AuthorID: 885047

ORCID: 0009-0009-9955-6044

ВОЛИК Андрей Сергеевич, заместитель начальника кафедры «Тактики и аварийно-спасательных работ»

Дальневосточная пожарно-спасательная академия

филиал Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России

(690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, д. 27, e-mail: a.s.volik@mail.ru)

SPIN: 9558-0619

AuthorID: 1212747

ORCID: 0009-0000-2414-3418

БУЛАТОВ Наиль Назимович, адъюнкт факультета подготовки кадров высшей квалификации

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России

(196105, Санкт-Петербург, Московский пр, д. 149, e-mail: Nail-442@mail.ru)

SPIN: 3222-1550

AuthorID: 1139041

ORCID: 0000-0002-9265-6116

ШЕШИНА Наталья Ивановна, заведующий учебной лабораторией

кафедры инженерной защиты окружающей среды

Санкт-Петербургский государственный Технологический институт (Технический университет)

(190013, Санкт-Петербург, Московский пр, д.24-26/49 литера А, e-mail: rabota1207@list.ru)

Аннотация. Статья посвящена проблеме влияния электрофизической обработки воды на пожарно-технические характеристики модифицированной воздушно-механической пены. В данной статье исследован эффект электрофизической обработки воды на характеристики пожаротушающей пены. В статье также рассматривается важность повышения эффективности систем пожаротушения, особенно в условиях низких температур, где возможны серьезные последствия пожара. Работа проведена с использованием модифицированной воды, полученной путем применения электрофизического метода обработки. Авторы подробно описывают методику проведения экспериментов и измерения пожарно-технических характеристик пены, включая временные характеристики распространения пены, ее покрытие и эффективность в тушении пожара. Результаты исследования показывают, что электрофизическая обработка воды способствует повышению пожарно-технических характеристик модифицированной пены, что может быть полезным при разработке более эффективных систем пожаротушения. Представленные результаты исследования также подтверждают потенциал электрофизической обработки воды для улучшения характеристик пожаротушающей пены, что может привести к более эффективному и быстрому тушению пожаров. Выводы статьи имеют практическую значимость для инженеров и специалистов в области пожарной безопасности.

Ключевые слова: воздушно-механические пены, обработка воды, пожар, прибор переменного частотно-модулированного потенциала, газонаполненная пена, магнитное поле, кратность, пожаротушение, окружающая среда, поверхностное натяжение.

SELECTION AND REASONING OF CORROSION-RESISTANT STRUCTURAL MATERIALS FOR THE PRODUCTION NEEDS OF THE OIL AND GAS COMPLEX

©The Author(s) 2023

VOLIK Andrey Sergeevich, deputy head of the Department of Tactics and Emergency Rescue Operations

Far Eastern Fire and Rescue Academy

branch of St. Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia

(690922, Primorsky Krai, Vladivostok, Russky Island, Ajax settlement, 27, e-mail: a.s.volik@mail.ru)

BULATOV Nail Nazimovich, postgraduate student of the faculty of training of highly qualified personnel

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

(196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149, e-mail: Nail-442@mail.ru)

SHESHINA Natalya Ivanovna, head of Educational Laboratory

of the Department of Environmental Protection Engineering

Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University)

(190013, St. Petersburg, Moskovsky pr., 24-26/49 lit. A, e-mail: rabota1207@list.ru)

Abstract. The article is devoted to the problem of the influence of electrophysical water treatment on the fire-technical characteristics of modified air-mechanical foam. In this article, the effect of electrophysical water treatment on the

characteristics of fire extinguishing foam was investigated. The article also discusses the importance of improving the efficiency of fire extinguishing systems, especially in low temperature conditions, where serious consequences of fire are possible. The work was carried out using modified water obtained by applying an electrophysical treatment method. The authors describe in detail the methodology of conducting experiments and measuring the fire-technical characteristics of foam, including the time characteristics of foam propagation, its coating and effectiveness in extinguishing a fire. The results of the study show that electrophysical water treatment contributes to the improvement of fire-technical characteristics of modified foam, which can be useful in the development of more efficient fire extinguishing systems. The presented research results also confirm the potential of electrophysical water treatment to improve the characteristics of fire extinguishing foam, which can lead to more efficient and rapid fire extinguishing. The conclusions of the article are of practical importance for engineers and specialists in the field of fire safety.

Keywords: air-mechanical foams, water treatment, fire, variable frequency modulated potential device, gas-filled foam, magnetic field, multiplicity, fire fighting, environment, surface tension.

Для цитирования: Волик А.С. Влияние электрофизической обработки воды на пожарно-технические характеристики модифицированной воздушно-механической пены / А.С. Волик, Н.Н. Булатов, Н.И. Шешина // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 12. – № 4(64). – С. 288-293. – EDN: IITSGS.

Введение. Пожары – это одна из самых опасных и разрушающих катастроф, которая может привести к тому что будут потеряны жизни людей нанесен серьезный ущерб окружающей среде а также экономике будет причинён огромный экономический вред. В зонах Крайнего Севера, характеризующихся суровыми климатическими условиями и отдаленными местами проживания эти угрозы становятся еще больше. Борьба с пожарами в таких условиях требует особых подходов и инновационных технологий, которые могут справиться как со сложными условиями, так и обеспечить эффективное тушение пожаров. Пена – одно из самых действенных огнетушащих веществ, потому что ее действие направлено на то, чтобы не только охладить зону горения, но и изолировать от кислорода воздуха.

Существует несколько технологий, которые используются для пожаротушения. Одной из наиболее распространенной считается воздушно-механическая пена (ВМП) – состоящая из: смеси воздуха, воды и пенообразователя, которая образует над зоной горения защитный слой, блокирующий доступ кислорода и охлаждает очаг горения [1]. Использование пены для тушения пожаров в Арктической зоне имеет особые преимущества:

1. Формируя пенный слой, она ограничивает распространение пламени. Однако отсутствие эффективных огнетушащих пенных ОТВ для пожаротушения ограничивают их применение в районах Крайнего Севера.

2. Пена легко адаптируется к экстремальным погодным условиям. Пенные ОТВ (ВМП)- их дисперсионная среда (H_2O) теоретически способна адаптироваться к условиям низких температур, как физико-химическими, так и химическими способами.

3. ВМП не содержат фторсодержащих пенообразователей (поллютантов) и поэтому экологически безопасны.

Применение пенных ОТВ в Арктической зоне представляет собой адаптировано важную задачу при борьбе с пожарами. Дальнейшее изучение и разработка технологий получения пены могут

существенно повысить эффективность тушения пожаров в условиях низких температур.

Методология. В городе Анадырь во время межведомственных опытно-исследовательских учений (Безопасная Арктика 2023). В ходе учений проводились исследования по эффективному применению ВМП при низких температурах. Нами также были изучены свойства пены, полученной традиционным способом, а также свойства электрофизической модифицированной ВМП. Усовершенствование пены было осуществлено с помощью обработки воды, которая используется в процессе получения раствора для создания пены переменным частично модулированным электрическим полем. При обработке воды происходит изменение ее свойств, таких как химические и коллигативные. Также перестраивается её структуры надмолекулярного происхождения. При электрофизическом влиянии поля, это приводит к снижению общего поверхностного натяжения, вязкости и плотности. [3,4] Важные значения при формировании пены имеют именно эти изменения при тушении пожаров пенными ОТВ. Были определены такие значения как; кратность и стойкость пены [5,6].

Для проведения эксперимента, к емкости автоцистерны подключался генератор прибор переменного частотно-модулированного потенциала (сигнала) (далее – ПЧМП) и проводилась обработка воды в течении 30 и 60 минут.

Результаты. Учитывая сложные климатические условия и принимая во внимание среднетемпературный минимум для г. Анадыря ($-12^{\circ}C$), в условиях лаборатории оценка скорости охлаждения воды (техническая, без пенообразователя), находящейся в резервуаре и их математическое моделирование в виде регрессионных уравнений свидетельствует о снижении скорости замерзания воды более чем в 1,2 раза (выше погрешности проведенных измерений) (табл. 1) [7].

Таким образом, собственные и ранее установленные экспериментальные изменения показателей

коллигативных свойств воды, предполагают некий отклик в изменениях пожарно-технических свойств ВМП, генерируемых на ее основе [8,9].

По истечении данного времени, осуществлялась подача ВМП на основе необработанной и обработанной воды с 6% масс в течении 10 секунд при помощи УКТП «Пурга-5». После прекращения подачи пены производилась фиксация времени ее разрушения. Рулеткой измерялись размеры пенной подушки (длина, ширина и высота).

Остановка секундомера фиксации времени разрушения пены осуществлялась в момент разрушения 50% полученного объема ВМП, полученных по различным методикам

Эксперимент проводился при температуре – 23°C.

Эксперименты показали, что при обработке воды ПЧМП кратность пены сокращается, так при обработке воды в течении 30 минут ее объем составил 3,45 м³, кратность – 70,0, а после обработке воды в течении 60 минут объем составил 3,4 м³, кратность – 68,0. Объем пены, полученной на основе необработанной воды, составил 5,0 м³, кратность – 100,0 (рис. 1).

Таким образом, можно утверждать, что обработка воды ПЧМП понижает кратность пены, при этом пена становится более плотной (рис. 2-4).

Ранее проводимые при положительной температуре эксперименты выявили ту же закономерность (рис. 5): чем дольше происходит обработка воды, тем меньше кратность пены.

Таблица 1 – Оценка скорости охлаждения воды

Уравнение регрессии $y=a+bx$			
Необработанная в теч. 30 мин.		Обработанная в теч. 30 мин.	
24.05 «необработанный» a 105.6408912189 b -8.7221494102 угол 27 °C	25.05 «необработанный» a 108.085106383 b -11.914893617 угол 30 °C	24.05 «обработанный» a 102.1791175186 b -8.5692442114 угол 27 °C	25.05 «обработанный» a 101.0638297872 b -8.9361702128 угол 33 °C
среднее значение – 10,3185215136		среднее значение – 8,7527072121	



Рисунок 1 – Изменения объема ВМП при температуре -23°C



Рисунок 2 – Пена, полученная без обработки воды ПЧМП



Рисунок 3 – Пена, полученная после обработки воды в течении 30 минут



Рисунок 4 – Пена, полученная после обработки воды в течении 60 минут

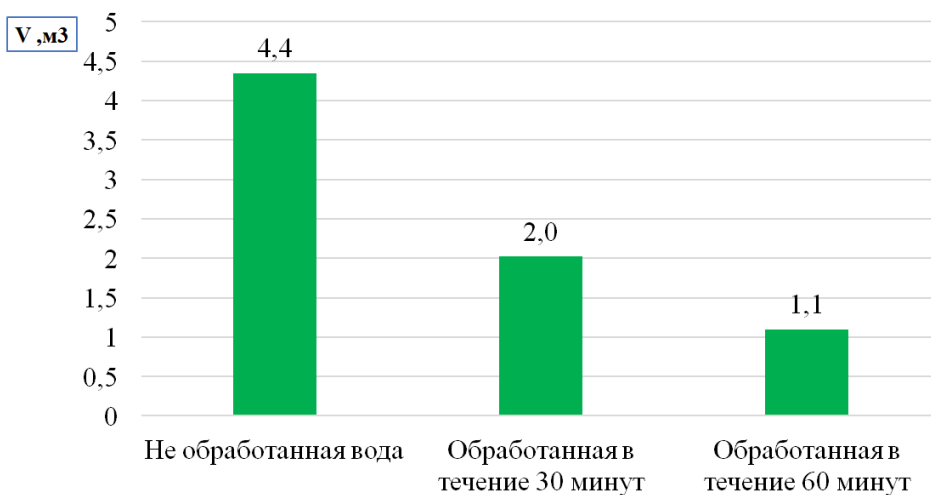


Рисунок 5 – Изменения объема ВМП при температуре +21°C

Сравнивая величины кратности ВМП при различных температурах, убеждаемся, что при отрицательных температурах её кратность больше, чем при положительных [10-12].

При определении времени разрушения ВМП (стойкости), устанавливаем факт увеличение ее стойкости. Так обработка ПЧМП в течение 30 минут увеличивает стойкость на 140% (в 2,4 раза), а обработка в течении 60 минут – на 1100% (в 11 раз) (рис. 6).

Следует отметить и тот факт, что на стойкость ВМП повлияла отрицательная температура окружающей среды. Замерзание ячеистой пленочно-канальной структуры пены привело к повышению её кратности пены и увеличивало время ее разрушения. [13,14].

Эксперименты, проводимые при плюсовых температурах, показали такие же изменения: при обработке воды в течении 30 минут стойкость пены увеличивается на 11,0%, при обработке воды в течении 60 минут – на 19,0% (рис. 7).

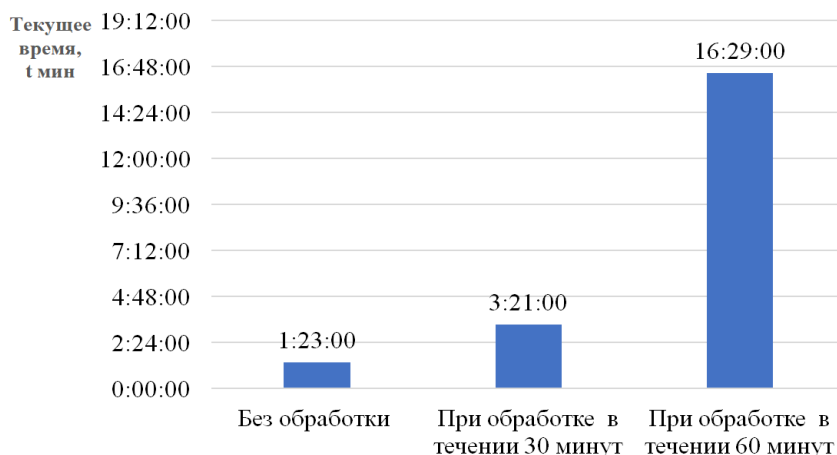


Рисунок 6 – Пена, полученная после обработки воды в течении 30 минут

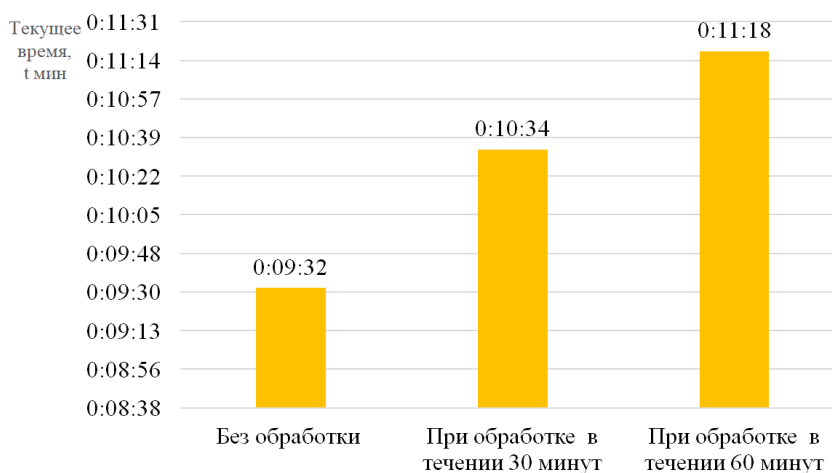


Рисунок 7 – Пена, полученная после обработки воды в течении 60 минут

Обсуждение. В данной статье результаты исследования показывают, что электрофизическая обработка воды способствует повышению пожарно-технических характеристик модифицированной пены таких как:(кратность, плотность и объём). Эти результаты согласуются с результатами некоторых предыдущих исследований в этой области.

Например, в работе [15-17] было выявлено, что электрофизическая обработка воды способствует улучшению пенопродукции и эффективности пены при тушении пожаров. Это подтверждает, что электрофизическая обработка воды имеет потенциал для использования в системах пожаротушения. Но в них не было исследовано поведение

воздушно-механических пен при отрицательных температурах. В нашем же случае, показано, что электрофизическая обработка воды приводит к улучшению характеристик пенного вещества и повышению его эффективности в тушении пожаров при отрицательных температурах. Эти результаты сходятся с выводами данной статьи о том, что электрофизическая обработка воды способствует повышению пожарно-технических характеристик модифицированной пены.

Статья освещает важность к проблемам пожаротушения и разработке более эффективных и безопасных методов тушения пожаров. Модифицированная воздушно-механическая пена является

одним из применяемых средств пожаротушения и ее характеристики важны для эффективного тушения пожаров.

Исследование влияния электрофизической обработки воды на пожарно-технические характеристики модифицированной воздушно-механической пены предлагает новые исследовательские данные и возможные рекомендации для улучшения эффективности и безопасности способов пожаротушения. Эта работа могла бы быть ценным вкладом в область пожарной безопасности и наращивания знаний о влиянии электрофизической обработки воды на химические и физические свойства пены в контексте пожаротушения.

Однако, следует отметить, что в некоторых исследованиях [18-20], могут быть некоторые различия в методиках и условиях проведения экспериментов, что может привести к разным результатам. Поэтому дальнейшие исследования в этой области и сравнительные анализы результатов различных работ будут полезными для получения более объективного представления о влиянии электрофизической обработки воды на пожарно-технические характеристики пенных систем.

Выводы. По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1) установлено, что отрицательные температуры положительно влияют на свойства модифицированных ВМП: (кратность, стойкость);

2) обработка воды ПЧМП снижают кратность пены, но увеличивает ее плотность, тем самым повышая и ее стойкость.

Результаты исследования показали, что электрофизическая обработка воды влияет на пожарно-технические характеристики модифицированной воздушно-механической пены. Было замечено, что обработанные образцы воды имели лучшую эффективность погашения пожара, более высокие показатели образования пены и более длительное время работы пеногенераторов.

Эти результаты объясняют изменения в физико-химических свойствах воды, произошедших в результате электрофизической обработки. Например, увеличение содержания определенных ионов или изменение поверхностного натяжения воды могут влиять на пенообразование и эффективность погашения пожара.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Коробейникова Е.Г., Чуприян А.П., Малинин В.Р., Ивахнюк, Г.К. Учебник «Химия Курс Лекций», 2011 г.
2. Волик А.С. Влияние электрического поля на огнетушащие свойства воздушно-механической пены / А.С. Волик, А.В. Квашнин, Г.К. Ивахнюк // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2020. – № 3(55). – С. 103-107. – EDN BZSSAC.
3. Азимов Д.С., Колесников С.В., Ивахнюк Г.К., Шешина Н.И., Поляков А.И. «Электрофизические и нанохимические инновации в обеспечении энергоресурсосбережения, промышленной и экологической безопасности»
4. Алексеик, Е.Б. Влияние переменных электрических полей на процессы создания и стабилизации воздушно-

механических пен / Е.Б. Алексеик, А.Е. Савенкова, З. Гемш // Научно-аналитический журнал "Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России". – 2013. – № 4. – С. 44-48. – EDN RSMACZ.

5. ГОСТ Р 51057-2001. Техника пожарная. Огнетушители. – М.: Изд-во стандартов, 2001.

6. Рекомендации по применению тактических возможностей подразделений пожарной охраны при тушении пожаров и проведении аварийно-спасательных работ. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2023.

7. Бирик Е.Е. Сборник задач по коллоидной химии: Уч. пособие. СПб., СПбГТИ, 2019. 57с. (№ 1410).

8. Фридрихсберг Д.А. Курс коллоидной химии. Л.: «Химия». 1984. 368 с.

9. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. - М.: Химия, 1989. - 463с.

10. Spiridonov E.K., Khabarova D.F. Foam Fixer Hydrodynamics and Design Calculation //Procedia Engineering. – 2016. – Т. 150. – С. 204-209.

11. Горбунов А.С., Дупляков Г.С. Исследование огнетушащих свойств воздушно-механических пен // Мат-лы всероссийской молодежной науч.-техн. конф. нефтегазовой отрасли «Молодая нефть». Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2016. С. 216-218.

12. Цыбульский, А.С. Электрофизические методы очистки воды / А.С. Цыбульский, А.В. Черняев // Экология промышленного производства. – 2014. – № 2(86). – С. 27-31. – EDN ULWCZJ.

13. Жуков, И.В. Электрофизический способ повышения огнетушащих свойств веществ, применяемых для тушения пожаров класса В / И.В. Жуков, В.А. Родионов, Р.Р. Вагапов // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. – 2007. – № 3. – С. 40-43. – EDN HZTKIZ.

14. Лебедева, Н.Ш. Экологически безопасные добавки к огнетушащим средствам, повышающие устойчивость пены / Н.Ш. Лебедева, Н.А. Таратанов // Современные проблемы гражданской защиты. – 2019. – № 4(33). – С. 61-73. – EDN PTTNNA.

15. Актуальные вопросы современной науки: Сборник статей по материалам XI международной научно-практической конференции. В 2-х частях, Томск, 24 апреля 2018 года. Том Часть 1. – Томск: Общество с ограниченной ответственностью Дендра, 2018. – 340 с. – EDN XWHBVB.

16. Иванов, А.В. Электрофизический метод улучшения огнетушащих и теплозащитных характеристик веществ на основе воды для целей тепловой защиты резервуаров нефтепродуктов / А.В. Иванов, Ф.А. Дали, Г.Л. Шидловский. – (Пожарная безопасность). – Текст: непосредственный // Безопасность жизнедеятельности. – 2020. – № 3 (231). – С. 25-29; рис. – Библиогр.: с. 29 (15 назв.). – ISSN 1684-6435.

17. Иванов, А.В. Нанотехнологические решения при обеспечении пожарной и промышленной безопасности инновационных промышленных предприятий / А.В. Иванов, Г.К. Ивахнюк, Л.В. Медведева // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). – 2016. – № 3(19). – С. 6-12. – EDN: XHWFMF.

18. Волик А.С., Речкин В.И., Хальченко Т.П. Новые технологии получения воздушно-механической пены при тушении пожаров // Природные и техногенные риски. 2019. № 2 (30). С. 39-42

19. Технология ведения аварийно-спасательных работ при ликвидации чрезвычайных ситуаций / Л.Г. Одинцов, С.П. Чумак, А.Ю. Виноградов [и др.]; Авторы, 2011 © МЧС России, 2011 © ФГУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2011. – Москва, 2011. – 286 с. – ISBN 978-5-93970-046-7. – EDN OJWVRB.

20. Исследование огнетушащих свойств воды и гидротелей с углеродными наноструктурами при ликвидации горения нефтепродуктов / А.В. Иванов, Д.П. Торопов, Г.К. Ивахнюк [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 2017. – Т. 26, № 8. – С. 31-44. – DOI 10.18322/PVB.2017.26.08.31-44. – EDN ZTUOXD.

Статья поступила в редакцию 05.11.2023

Статья принята к публикации 15.12.2023

УДК 631.4

EDN: IOONWJ

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЛАГОПРОВОДНОСТИ ПОЧВЫ ПРИ ОЦЕНКЕ АНТРОПОГЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

© Авторы 2023

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)*

SPIN: 6516-2037

AuthorID: 478195

ORCID: 0000-0002-9520-4094

ResearcherID: AAE-9510-2019

ЕФРЕМОВА Саня Юнусовна, профессор, доктор биологических наук,
профессор кафедры «Биотехнологии и техносферная безопасность»

Пензенский государственный технологический университет

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

SPIN: 8229-3847

AuthorID: 700624

ORCID: 0000-0002-3598-1158

ResearcherID: AAV-5394-2020

ХОЛУДЕНЕВА Алина Олеговна, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Техническое управление качеством»

Пензенский государственный технологический университет

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

Аннотация. Определение степени поражения почвы токсичными веществами, приводящими к деградации и выводу почв из хозяйственного оборота, не возможно без уточнения данных по глубине и времени проникновения в почву этих веществ. Разработка прогнозно-аналитических математических моделей и методик управления экологическими рисками негативного воздействия на почву весьма актуально и требует рассмотрения различных подходов решения этой проблемы. В данной работе предложен метод определения коэффициентов переноса для уравнений влагопроводности почвы при оценке антропогенного воздействия. Найденные коэффициенты переноса, дают результаты решения уравнения влагопроводности сходимые с экспериментальными данными, чем при использовании опытных значений. Решение задач тепло-массопереноса, а именно знание коэффициентов переноса, значения которых, как правило, определены с большой ошибкой, предложенный метод позволяет найти их более точно и тем самым избежать неточностей при определении параметров влагоемкости и температуры.

Ключевые слова: поле влажности, антропогенное воздействие, коэффициент переноса, уравнение влагопроводности почвы.

PREDICTION OF SOIL MOISTURE CONDUCTIVITY WHEN ASSESSING ANTHROPOGENIC IMPACTS

© The Author(s) 2023

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

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

EFREMOVA Sania Yunusovna, professor, doctor of biological sciences,
professor of the Department of Biotechnology and Technosphere Safety

Penza State Technological University, Penza

(440039, Russia, Penza, Baidukova proezd/Gagarin st., 1a/11 e-mail: s_sharkova@mail.ru)

KHOLUDENEVA Alina Olegovna, candidate of technical sciences,
associate professor of the Department of Technical Quality Management

Penza State Technological University, Penza

(440039, Russia, Penza, Baidukova proezd/Gagarina st., 1a/11 e-mail: linblondy@mail.ru)

Abstract. Determining the degree of soil damage by toxic substances leading to soil degradation and removal from economic use is not possible without clarifying data on the depth and time of penetration of these substances into the

soil. The development of predictive and analytical mathematical models and methods for managing environmental risks of negative impacts on soil is very important and requires consideration of various approaches to solving this problem. This paper proposes a method for determining transfer coefficients for soil hydraulic conductivity equations when assessing anthropogenic impact. The found transfer coefficients give results for solving the hydraulic conductivity equation that are closer to the experimental data than when using experimental values. Solving the problems of heat and mass transfer, namely the knowledge of transfer coefficients, the values of which, as a rule, are determined with a large error, the proposed method allows you to find them more accurately and thereby avoid inaccuracies in determining the parameters of moisture capacity and temperature.

Keywords: humidity field, anthropogenic impact, transfer coefficient, soil hydraulic conductivity equation.

Для цитирования: Панфилова М.И. Прогнозирование влагопроводности почвы при оценке антропогенных воздействий/ М.И. Панфилова, С.Ю. Ефремова, А.О. Холуденева // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 12. – № 4(64). – С. 294-297. – EDN: IOONWJ.

Введение. Проблемы экологии являются в настоящее время весьма актуальными, в частности для сельского хозяйства, в особенности при водопользовании из природных источников [1,7,10].

Для определения степени поражения почвы токсичными веществами, приводящими к деградации и выводу почв из хозяйственного оборота, необходимо знать насколько глубоко и за какое время эти ингредиенты проникают в почву.[9]

Методология. Несмотря на то, что скорость проникновения влаги в почву мала (поле влажности устанавливается гораздо медленнее, чем температурное поле), расчеты влагоемкости очень важны для решения агроэкологических проблем.

Для расчета содержания влаги в почве необходимо решить нелинейное уравнение влагопроводности. Основная проблема состоит в том, что для получения решения необходимо знать коэффициенты переноса, которые в свою очередь зависят от влажности или потенциала влажности. Заметим, что с подобными трудностями можно встретиться при проведении расчетов температурных полей – для них необходимо определение коэффициента температуропроводности [4,6,8].

Известные из экспериментов зависимости коэффициентов переноса обычно имеют достаточно сложный вид (рис. 1).

При использовании для расчетов этих коэффициентов, а затем при решении уравнения, могло

быть получено достаточно большое расхождение экспериментальных и расчетных данных.

В ходе исследования решалась задача по определению оптимальных коэффициентов влагопроводности по экспериментальным данным. Для этого численно решалось нестационарное уравнение [2]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k(u) \frac{\partial u}{\partial x} \right], \# \quad (1)$$

где $u=u(x,t)$.

Расчетная область представляла отрезок прямой от $x=0$ до $x=L=0.27$ м. Граничные и начальные условия: $u(x=0)=0.86$ кг/кг, $u(x=L)=0.04$ кг/кг, $u(t=0)=0.04$ кг/кг. Численное решение проводилось с помощью библиотеки *FIPY* для языка программирования *Python*, в которой реализован метод конечных объемов [5].

Выражение для коэффициента $k(u)$ бралось в следующем виде:

$$k(u) = \frac{a}{x^3} + bx^2 + cx + d \# \quad (2)$$

В качестве начального приближения коэффициенты a, b, c, d были определены фитированием экспериментальных значений [3] коэффициентов влагопроводности (рис. 1) и приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Коэффициенты уравнения (2), определенные из экспериментальных данных на рисунке 1 [2].

a	b	c	d
$1,46 \cdot 10^{-9}$	$6,6 \cdot 10^{-5}$	$-2,58 \cdot 10^{-5}$	$0,714 \cdot 10^{-5}$

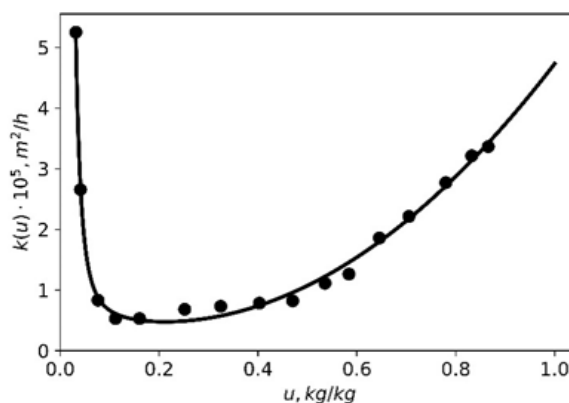


Рисунок 1 – Экспериментальные данные изменения коэффициента влагопроводности [3] и фитирование по уравнению (2)

Результаты. Сравнение проводилось с двумя экспериментальными графиками (рис. 2) – стационарным полем влажности и полем влажности, измеренным в момент времени $t=145$ ч [3].

Коэффициенты уравнения (2) подбирались таким образом, чтобы обеспечить наилучшее совпадение с экспериментальными данными, представленными на рисунке 2.

Кривые, рассчитанные после оптимизации, представлены на рисунке 3.

На рисунке 3б сплошная линия – результат численного решения уравнения (1), штриховая линия на (б) – аналитическое решение.

С учетом нового выражения $k(u)$ стационарная

форма уравнения $\frac{\partial}{\partial x} \left[k(u) \frac{\partial u}{\partial x} \right] = 0$ решается в следующем виде:

$$-\frac{a}{2x^2} + \frac{bx^3}{3} + \frac{cx^2}{2} + dx = c'x + c'' \quad (3)$$

После подстановки граничных условий получаем значения $c'=-3.99$, $c''=1.06$.

Из рисунка 3б видно, что достигается совпадение, как с численным, так и с аналитическим результатом.

На рисунке 4 показано сравнение коэффициента влагопроводности, используемого в качестве первого приближения и определенного после оптимизации коэффициентов уравнения (2). В таблице 2 – конечные коэффициенты уравнения (2).

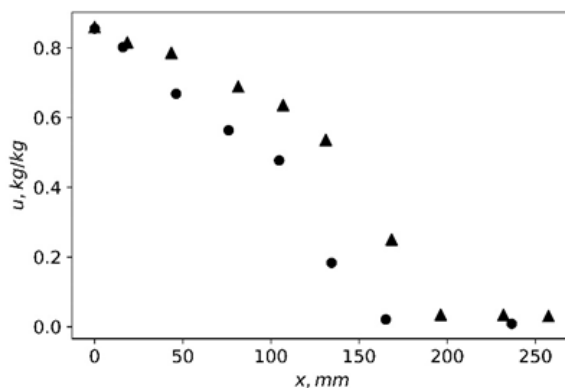


Рисунок 2 – Экспериментально определенное поле влажности для двух моментов времени – $t=145$ ч (круглые символы) и стационарное поле (треугольники)

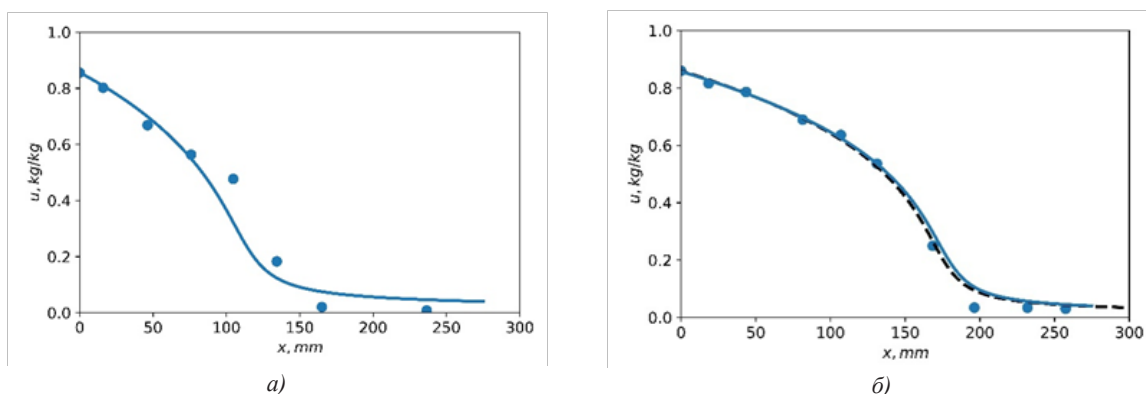


Рисунок 3 – Поле влажности, полученное после оптимизации коэффициентов уравнения (2) для $t=145$ ч (а) и стационарного случая (б)

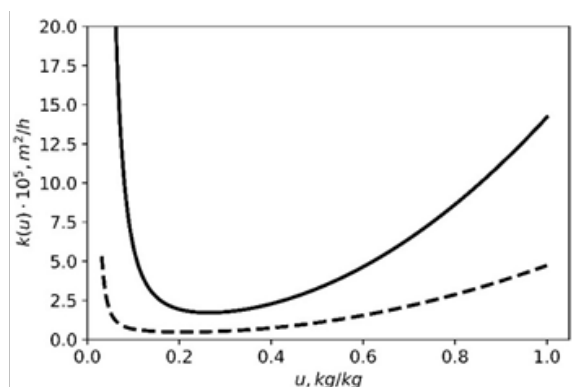


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента влажности, используемого в качестве начального приближения (штриховая линия) и определенного по экспериментальным данным (сплошная линия)

Таблица 2 – Коэффициенты уравнения (2) до и после оптимизации

	a	b	c	d
Исходные	$1,46 \cdot 10^{-9}$	$6,6 \cdot 10^{-5}$	$-2,58 \cdot 10^{-5}$	$0,714 \cdot 10^{-5}$
Уточненные	$4,21 \cdot 10^{-8}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$-7,12 \cdot 10^{-5}$	$2,04 \cdot 10^{-5}$

Обсуждение. Коэффициенты переноса – один из ключевых параметров в уравнении влагопроводности, так как именно посредством этих коэффициентов можно определить скорость переноса влаги через почву. Поэтому прикладная задача определения коэффициентов переноса крайне важна для исследования уровня воздействия на почву негативных факторов производственно-хозяйственной деятельности, например при осуществлении оценки воздействия антропогенных объектов на почву и проведения экологической экспертизы.

При соблюдении условия точного подбора значений коэффициентов переноса, результаты решения уравнения будут наиболее приближенными к реальным данным. Поэтому важно проводить эксперименты и находить коэффициенты переноса, специфичные для конкретной почвы или условий. Такие значения коэффициентов могут учитывать микроструктуру почвы, влажность, температуру и другие факторы, что делает результаты численного моделирования более точными и соответствующими реальным условиям. Прямое использование значений коэффициентов переноса, полученных в ходе опытов, может привести к снижению точности результатов при моделировании переноса влаги в почве.

Выводы. Из полученных результатов можно сделать следующие, найденные указанным способом коэффициенты переноса, дают результаты решения уравнения влагопроводности сходимые с экспериментальными данными, чем при использовании опытных значений.

Указанный метод может быть использован для получения значений проникновения влаги в почву и для оценки влагопроводности, что является важным при дальнейшем ее использовании.

В связи с главной проблемой, возникающей при решении задач тепло-массопереноса, а именно знание коэффициентов переноса, значения которых, как правило, определены с большой ошибкой, предложенный метод позволяет найти их более точно и тем самым избежать неточностей при определении параметров влагоемкости и температуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Баршполец В.А. Экология: концепции и решения. Баршполец В.А. /Анализ глобальных экологических проблем. – С. 79-82, 2021.
2. Parfentjeva N.A. (2014) Approximated solution to the problem of determining the moisture potential in the enclosure. Natural and Technical Sciences, pp. 25-32.
3. Paulauskaite S. Determination of state characteristics and moisture transport of loose and fibrous materials. Theses of republican scientific and technical. Conference. Shauliai, p.106-116, 2002.
4. Пономарев С.В., Дивина Д.А., Щекочихин А.С.

Выбор оптимальных рабочих параметров при измерении коэффициентов температуропроводности теплоизоляционных материалов. Методы измерения. – 55 №1. – 2012. С. 68-72.

5. Guyer, Jonathan & Wheeler, Daniel & Warren, James. (2009). FiPy: Partial Differential Equations with Python. Computing in Science and Engineering. 11. 6-15. 10.1109/MCSE.2009.52.

6. Серебренников Ф.В. Анализ гидрофизических функций в приложении к прогнозам влагопереноса в почвах // Роль природообустройства сельских территорий в обеспечении устойчивого развития АПК. – 2007. – С. 140-148.

7. Прокопец Р.В., Серебренников Ф.В. Учет гидрофизических свойств почвы при оценке объема поверхностного стока на орошаемых землях // Природообустройство. – 2015. – №. 4. – С. 31-34.

8. Фалькович А.С., Пронько Н.А. Трансформация почвенно-мелиоративных процессов при изменении водного баланса агроландшафтов Нижнего Поволжья // Состояние и перспективы развития агропромышленного комплекса. – 2020. – С. 610-614.

9. Магущенко А.Е., Полуэктов А.А., Вульшинская И.В. Зависимость потенциала переноса влаги от влагосодержания почвы //Материалы пула научно-практических конференций. – 2022. – С. 223-226.

10. Лавров С.А. влияние климатических изменений на вертикальный влагообмен в почвах (на примере бассейна реки волги) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2021. – №. 4. – С. 47-66.

Статья поступила в редакцию 07.11.2023

Статья принята к публикации 15.12.2023

УДК 504.06

EDN: LVMATY

**ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ОПОЛЗНЕЙ КАК ИНСТРУМЕНТ МОНИТОРИНГА
БЕЗОПАСНОСТИ В ЦИКЛЕ УПРАВЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИМИ РИСКАМИ**

© Автор(ы) 2023

SPIN: 7092-6913

AuthorID: 967939

ORCID: 0000-0003-0141-1998

ScopusID: 57208213064

ФРОЛОВА Нина Анатольевна, доктор технических наук,

доцент, профессор кафедры «Инжиниринга технологического оборудования»

Калининградский государственный технический университет

(236022, Российская Федерация, г. Калининград, пр-т. Советский 1, e-mail: ninelfr@mail.ru)

SPIN: 7092-6913

AuthorID: 967939

ORCID iD 0000-0002-5193-452X

ScopusID: 57208205367

ШКРАБТАК Наталья Викторовна, доктор технических наук,

доцент, профессор кафедры «Безопасности жизнедеятельности»

Амурский государственный университет

(675028, Российская Федерация, г. Благовещенск, Игнатъевское шоссе 21, e-mail: mmip2013@mail.ru)

SPIN: 4711-2516

AuthorID: 1026686

ScopusID: 57211227027

СТЕПАКОВА Наталья Николаевна, кандидат технических наук,

доцент кафедры «Безопасности жизнедеятельности»

Амурский государственный университет

(675028, Российская Федерация, г. Благовещенск, Игнатъевское шоссе 21, e-mail: kitex74@mail.ru)

Аннотация. Визуализация потенциальных мест появления оползней при помощи картирования и регулярного мониторинга способствует снижению экологических последствий после их воздействия. В настоящее время для этих целей используется спутниковая информация, лазерное сканирование, а также данные с беспилотных летательных аппаратов и цифровых камер. В статье рассматривается использование метода оптического дистанционного зондирования местности для интерпретации изображений, идентификации характеристик и эффективного мониторинга мест появления оползней. Для детальных исследований оползней, в том числе обнаружения поверхностных трещин во временных рядах в локальном масштабе был разработан алгоритм корреляции и обработки полученных изображений из различных источников: с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), выступающих в качестве геоиндикаторов оползневой активности с последующим измерением горизонтальных смещений поверхности на спутниковых снимках; *VHR* (с пространственным разрешением менее 1 м) и дополнительным использованием стереофотограмметрии с *3D*-измерением наземных фотографий на основе многоэкранной фотограмметрии. В данном процессе дополнительное использование стереофотограмметрии с *3D*-измерением наземных фотографий на основе многоэкранной фотограмметрии позволяет улучшить качество полученных результатов.

Ключевые слова: потенциальное место появления, оползень, картографирование, мониторинг, оптическое дистанционное зондирование.

**REMOTE SENSING OF LANDSLIDES AS A SAFETY MONITORING TOOL
IN THE CYCLE OF ENVIRONMENTAL RISK MANAGEMENT**

©The Authors 2023

FROLOVA Nina Anatolyevna, doctor of technical sciences, associate professor,

professor of the department of «Engineering of Technological Equipment»

Kaliningrad State Technical University

(236022, Russian Federation, Kaliningrad, Sovetsky Ave. 1, e-mail: ninelfr@mail.ru)

SHKRABTAK Natalya Viktorovna, doctor of technical sciences,

associate professor, professor of the department of life safety

Amur State University

(675028, Russian Federation, Blagoveshchensk, Ignatievskoe highway 21, e-mail: mmip2013@mail.ru)

СТЕПАКОВА Natalya Nikolaevna, candidate of technical sciences,

associate professor of the department of life safety

Amur State University

(675028, Russian Federation, Blagoveshchensk, Ignatievskoe highway 21, e-mail: kitex74@mail.ru)

Abstract. Visualization of potential landslide sites through mapping and regular monitoring contributes to the reduction of environmental impacts after their impact. At present, satellite information, laser scanning, as well as data from unmanned aerial vehicles and digital cameras are used for these purposes. The article discusses the use of optical remote sensing of the area for image interpretation, identification of characteristics and effective monitoring of landslides. For detailed studies of landslides, including the detection of surface cracks in time series on a local scale, an algorithm was developed for correlation and processing of images obtained from various sources: from unmanned aerial vehicles (UAVs), acting as geoindicators of landslide activity, followed by measuring horizontal displacements of the surface on satellite images. In this process, the additional use of stereophotogrammetry with 3D measurement of terrestrial photographs based on multiscreen photogrammetry improves the quality of the results obtained. To detect surface cracks in time series on a local scale, an algorithm was developed for correlating and processing images obtained from various sources: from unmanned aerial vehicles (UAVs), acting as geoindicators of landslide activity, followed by measuring horizontal displacements of the surface on VHR satellite images (with spatial resolution less than 1 m) and the additional use of stereophotogrammetry with 3D measurement of terrestrial photographs based on multiscreen photogrammetry.

Keywords: potential place of occurrence, landslide, mapping, monitoring, optical remote sensing

Для цитирования: Фролова Н.А. Дистанционное зондирование оползней, как инструмент мониторинга безопасности в цикле управления экологическими рисками / Н.А. Фролова, Н.В. Шкрабтак, Н.Н. Степакова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 12. – № 4(64). – С. 298-302. – EDN: LBMATY.

Введение. В связи с изменением природно-климатических условий и увеличением техногенной нагрузки в РФ ежегодно отмечается тенденция увеличения опасных оползневых массивов, которые представляют угрозу жизни и материальным ценностям людей [1-4]. Известно, что потенциальными местами появления оползней являются центральные, восточные и западные регионы страны: Поволжье, Северный Кавказ, Восточная Сибирь, Приморье, остров Сахалин, Кольский и Камчатский полуостров и другие) [3].

В настоящее время проводятся исследования различного уровня о механизме возникновения оползней [5-9]. В частности, пространственные и временные явления: тип движения, геометрия, интенсивность и другие описательные параметры должны быть учтены при оценке и возможности потенциальных мест появления оползней [10-11]. Новые технологии дистанционного зондирования оползней требуют адаптации и валидации. Сегодня, на рынке доступно множество различных оптических систем дистанционного зондирования и продуктов для обработки полученных результатов [6]. Системы, обладающие значительным потенциалом для применения при анализе оползней, включают портативные камеры, самолеты, БПЛА, VHR спутники с коротким временем повторного просмотра и пространственным разрешением, которые отображают характерные особенности различных типов оползней и могут также использоваться для измерений смещений [12-15].

Методология. Целью работы явилось изучение эффективности разработанного метода дистанционного зондирования оползней. Предложенный метод дистанционного зондирования оползней заключается в непрерывном алгоритме корреляции и обработки полученных изображений из различных источников: с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), выступающих в качестве геоиндикаторов

оползневой активности с последующим измерением горизонтальных смещений поверхности на спутниковых снимках VHR (с пространственным разрешением менее 1 м) и дополнительным использованием стереофотограмметрии с 3D-измерением наземных фотографий на основе многоэкранной фотограмметрии.

Результаты. Снижение опасности оползней зависит не только от пространственно-временной информации частоты и распределения, а также от их предрасполагающих и запускающих факторов количественной оценки и понимания кинематики и механических процессов [16-20]. Основные задачи по оценке оползневой опасности – это характеристика оползневых процессов в случае стихийного бедствия, долгосрочный их мониторинг и прогнозирование при помощи статистического моделирования.

Основываясь на цикле управления рисками в качестве концептуальной основы, можно выделить четыре возможных этапа применения методов дистанционного зондирования (рис. 1).

Концепция мониторинга дистанционного зондирования оползней в цикле управления рискам включает в себя следующие этапы: характеристику, мониторинг, стабилизацию и быструю идентификацию.

Характеристика включает детальные исследования типов оползней, их составных частей, состояние и объемы возможного экологического бедствия, а также сбор информации сопутствующих факторах, влияющих на ход событий. Мониторинг – это периодическое или постоянное получение наблюдений о временных изменениях физических характеристик оползней. Быстрая идентификация обычно направлена на создание карт регионального и локального масштаба. Значительный прогресс (пространственное и спектральное разрешение, повторяемость измерений) и диверсификация технологий в области пассивного дистанционного зон-

дирования (оптические изображения с наземных, воздушных и космических платформ сбора данных) значительно способствуют улучшению возможности картирования и мониторинга неустойчивых склонов. Стабилизация ситуации зависит от вышеуказанных этапов и достигается при помощи

разработки сценариев развития событий. В этом контексте пассивное дистанционное зондирование помогает расширить знания о кинематических процессах оползней. Схематическое изображение дистанционного зондирования оползней представлено на рисунке 2.



Рисунок 1 – Концепция мониторинга дистанционного зондирования оползней в цикле управления рисками

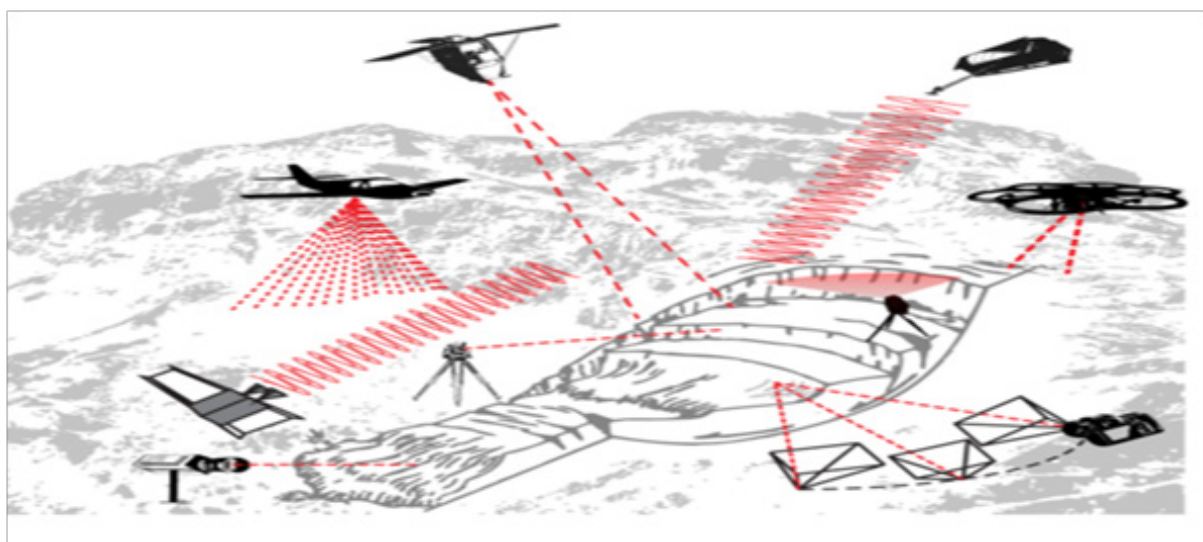


Рисунок 2 – Схематическое изображение дистанционного зондирования оползней

Предварительный метод обработки изображений концентрирует использование оригинальных гауссовских фильтров математической морфологии и методов объектно-ориентированного анализа изображений для полуавтоматического картирования трещин из рядов изображений с дронов. Полученные карты проверяются с помощью экспертных карт эволюции трещин в зависимости от скорости

движения и геометрии поверхности скольжения. Затем предлагается вторая технологическая цепочка для расчета моделей поверхности с высоким пространственным разрешением и полей смещения на основе спутниковых изображений. Она применяется на трех разных участках и позволяет впервые измерять скорость горизонтального перемещения с точностью до дециметра. Кроме того, одна такая

точность достигается без наземных контрольно-пропускных пунктов, что является важным преимуществом для автоматизации оперативного мониторинга.

Обсуждение. Обнаружение изменений между полученными результатами позволяют количественно

оценить доминирующие геоморфологические процессы (оползни, сток) с детализацией представления о полях деформации и фазах ускорения. Изображения, полученные при помощи дистанционного зондирования (горный массив Северного Кавказа) представлен на рисунке 3.

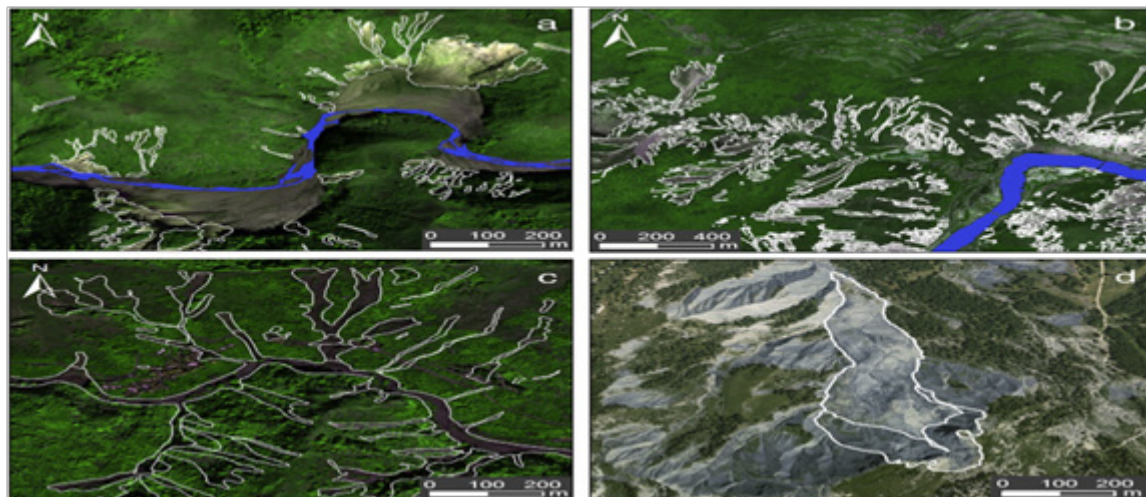


Рисунок 3 – Изображения, полученные при помощи дистанционного зондирования

На каждом снимке, полученном при помощи дистанционного зондирования были отобраны определенные участки, которые включали оползни и спектрально похожие объекты (речные, городские районы, дороги, бесплодные земли и поля). К изображениям из каждой области был применен масштабируемый алгоритм сегментации и рассчитан полный набор показателей. Данные этапы обработки выполнены с помощью программного обеспечения, которое реализует интерполяцию ближайших объектов. После сегментации и расчета идентификации оползней, составленная на основе полевых работ и визуальных изображений выборочная база данных, в которой все обнаруженные объекты были отнесены либо к объектам, связанным с оползнем, либо к объектам, не связанным с оползнем.

Выводы. Таким образом, использование «нового» метода обработки изображений для картирования, идентификации характеристик и эффективного мониторинга потенциальных мест появления оползней с использованием данных оптического дистанционного зондирования является эффективным с точки зрения снижения экологических последствий. Для детальных исследований оползней, в том числе обнаружения поверхностных трещин во временных рядах в локальном масштабе был разработан алгоритм корреляции и обработки полученных изображений из различных источников: с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), выступающих в качестве геоиндикаторов оползневой активности с последующим измерением горизонтальных смещений поверхности на спутниковых снимках VHR (с пространственным разрешением менее

1м) и дополнительным использованием стереофотограмметрии с 3D-измерением наземных фотографий на основе многоэкранной фотограмметрии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Фролова Н.А. Анализ несчастных случаев в промышленных секторах Дальневосточного региона и пути решения проблемы безопасности // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2022. – № 2. – С. 101-104.
2. Зеркаль О.В. Оползни скольжения и оползни сдвига: особенности развития и типизация // Инженерная геология. 2021. – Т. 16. – № 1. – С. 38-59.
3. Ganapathy G.P., Zaalishvili V.B., Melkov D.A. Landslides rainfall thresholds approaches for the Western Ghats India and the North Caucasus (Russia) // Sustainable Development of Mountain Territories. 2021. – Vol. 13. – No. 3(49). – P. 379-386.
4. Самигуллина К.С., Идрисов Р.Х. Оползни и меры борьбы с ними // Аллея науки. – 2021. – Т. 1. – № 11(62). – С. 258-261.
5. Новикова Э.В., Карагозян С.С., Мурылев В.Ю. Чрезвычайные ситуации природного характера Саратовской области: наводнения, оползни // Авиценна. – 2020. – № 74. – С. 8-13.
6. Васьков И.М., Юсупов А.Р. Обвалы и оползни в горных долинах // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. – 2017. – № 68. – С. 34-42.
7. Ломтев В.Л. Оползни на подводных окраинах в эпоху пасаденской орогении // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2018. – № 1(51). – С. 35-45.
8. Шешнев А.С. Техногенные оползни в овражно-балочных системах Саратова (на примере Глебучева оврага) // А.С. Шешнев // Геоморфология. 2017. – № 3. – С. 30-37.
9. Ольнева Т.В. "Сейсмовидение" геологических процессов и явлений: оползни / Т.В. Ольнева, В.Ю. Овечкина // Геофизика. – 2015. – № 4. – С. 20-26.
10. Смирнова И.О., Кирсанов А.А. Состояние и перспективы использования данных дистанционного зондирования при изучении экзогенных геологических процессов на примере оползней // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2021. – Т. 18. – № 3. – С. 26-48.
11. Сафаров М.С., Фазылов А.Р. Применение современных технологий дистанционного зондирования для мониторинга селеопасных районов горных территорий //

ГеоРиск. – 2020. – Т. 14. – № 2. – С. 32-41.

12. Анаев М.А., Гуня А.Н., Мальнева И.В. Эффекты наложения опасных склоновых процессов и управленческие стратегии по защите от них (на примере Кабардино-Балкарской Республики) // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. – 2022. – Т. 16. – № 3. – С. 37-44.

13. Остроухов А.В., Ким В.И., Махинов А.Н. Оценка морфометрических параметров оползня на Бурейском водохранилище и его последствий на основе ДДЗЗ и данных полевых измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16. – № 1. – С. 254-258.

14. Карпик А.П., Хорошилов В.С., Комиссаров А.В. Анализ методов и средств изучения динамики перемещений оползневых склонов // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2021. – Т. 26. – № 6. – С. 17-32.

15. Баборыкин М.Ю., Жидиляева Е.В., Погосян А.Г. Выявление токсичных тканей при обработке инженерно-геологических изысканий на основе цифровых моделей тектуры // Инженерные изыскания. – 2015. – № 2. – С. 30-36.

16. Ganapathy G.P., Zaalishvili V.B., Melkov D.A., F.B. Kazieva. Landslides rainfall thresholds approaches for the Western Ghats India and the North Caucasus (Russia) // Sustainable Development of Mountain Territories. – 2021. – Vol. 13. – No. 3(49). – P. 379-386.

17. Vorobyov A.E., Hovhannisyan A.N., Kozhogulova G.K. Identifying the main features of landslide movement and developing the basic mechanisms // Proceedings of National Polytechnic University of Armenia. Metallurgy, Material science, Mining Engineering. – 2022. – No. 1. – pp. 97-109.

18. Сабитова Н.И., Стельмах А.Г., Таджибаева Н.Р. Применение ГИС-технологий и карт пластики рельефа для исследования оползней Чирчикского бассейна // ИнтерКарто. ИнтерГИС. – 2022. – Т. 28. – № 1. – С. 670-682.

19. Агаркова-Лях И.В., Лях А.М. Техногенный оползень в Василевой балке (Юго-Западный Крым) как фактор формирования современного рельефа и ландшафтов // Геополитика и экогеодинамика регионов. – 2020. – Т. 6 (16). – № 1. – С. 180-191.

20. Агеев С.В., Подрезов Ю.В., Романов А.С. Особенности возникновения и динамики оползней на территории Российской Федерации // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2019. – № 2. – С. 73-81.

Статья поступила в редакцию 25.10.2023

Статья принята к публикации 15.12.2023