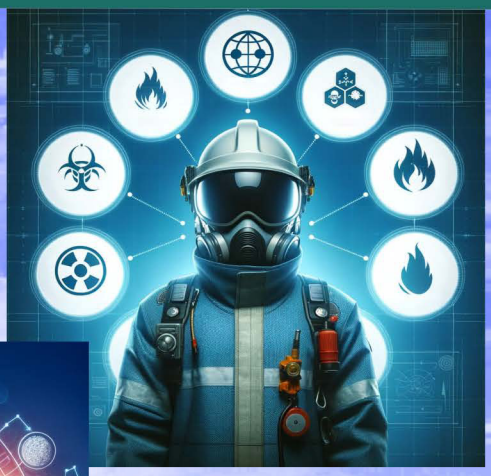
18+

vek21.penzgtu.ru

ISSN 2221-951X

# XXI век: ИТОГИ ПРОШЛОГО И ПРОБЛЕМЫ НАСТОЯЩЕГО плюс







2024

№2(66) т.13

технические науки

Основан в 2011 г.

18+

# XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего *плюс*

Том 13
№ 2 (66)
2024

Учредитель – ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет»

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.

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

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

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

***Ответственный секретарь***
Коростелева Анна Владимировна, кандидат технических наук

Компьютерная верстка:
В.В. Зупарова

Технический редактор:
В.В. Зупарова

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

Подписано в печать 19.06.2024.
Выход в свет 27.06.2024.
Формат 60X84 1/8
Печать ризография.
Усл. печ. л. 26,2.
Тираж 100 экз. Заказ № 175.

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

*Цена свободная*

© ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет, 2024

## СВЕДЕНИЯ О ЧЛЕНАХ РЕДКОЛЛЕГИИ

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

***Заместители главного редактора:***
Авроров Валерий Александрович, доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры «Пищевые производства»
*(Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Россия)*
Ефремова Сания Юнусовна, доктор биологических наук, профессор,
профессор кафедры «Биотехнологии и техносферная безопасность»
*(Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Россия)*
Мотовилов Олег Константинович, доктор технических наук, доцент, начальник отдела пищевых систем и биотехнологий, главный научный сотрудник
*(Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук, Новосибирская область, Новосибирский район, р.п. Краснообск, Россия)*
Пащенко Дмитрий Владимирович, доктор технических наук, профессор, ректор
*(Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Россия)*
Политаева Наталья Анатольевна, доктор технических наук, профессор,
профессор Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства
*(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт- Петербург, Россия)*
Чулков Валерий Александрович, доктор технических наук, доцент,
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)*
Антипов Сергей Тихонович, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Машины и аппараты пищевых производств»
*(Воронежский государственный университет инженерных технологий, г. Воронеж, Россия)*
Базарнова Юлия Генриховна, доктор технических наук, профессор,
директор Высшей школы биотехнологии и пищевых технологий
*(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт- Петербург, Россия)*
Бакин Игорь Алексеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Процессов и аппаратов перерабатывающих производств» (*Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А.Тимирязева г. Москва, Россия)*
Баширов Мусса Гумерович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий *(Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Салавате), Институт нефтепереработки и нефтехимии, г. Салават, Россия)*
Богданов Андрей Владимирович, доктор технических наук, 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 автоматики 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, профессор кафедры пищевой инженерии *(Уральский государственный экономический университет, г. Екатеринбург, Россия)*
Рыбаков Анатолий Валерьевич, доктор технических наук, профессор, начальник научно-исследовательского центра Академия гражданской защиты *(Академия гражданской защиты МЧС России, г. Москва, Россия)*
Стороженко Павел Аркадьевич, член-корреспондент Российской академии наук, доктор химических наук, профессор, управляющий директор ГНЦ РФ «Государственный ордена Трудового Красного Знамени НИИ химии и технологии элементоорганических соединений», профессор кафедры химии и технологии элементоорганических соединений
*(Московский институт тонкой химической технологии имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия)*
Танклевский Леонид Тимофеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Пожарная безопасность» *(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Высшая школа техносферной безопасности, г. Санкт-Петербург, Россия)*
Таранцева Клара Рустемовна, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Биотехнологии и техносферная безопасность» *(Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Россия)*
Тихомирова Елена Ивановна, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой «Экология и техносферная безопасность» *(Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина, г. Саратов, Россия)*
Шалагин Сергей Викторович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Компьютерные системы» *(Казанский Национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева, г. Казань, Россия)*
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

**Колонка редактора**.....10

### *ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ*

**ТЕХНОЛОГИЯ *HDR* СКАНИРОВАНИЯ НЕГАТИВНОЙ И ПОЗИТИВНОЙ КИНОПЛЁНКИ С ЦИФРОВОЙ ПОСТОБРАБОТКОЙ**
Ковалев Игорь Владимирович, Блинников Александр Вениаминович.....11

**О ДАТЧИКАХ СЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ В СЕТЕВЫХ УСТРОЙСТВАХ НА БАЗЕ РАНДОМИЗИРОВАННЫХ АЛГОРИТМОВ**
Семенов Андрей Олегович, Пышкина Ирина Сергеевна.....19

**ИНТЕГРАЦИЯ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ С БАЗАМИ ЗНАНИЙ И ВНЕШНИМИ ИСТОЧНИКАМИ ДАННЫХ**
Маркин Евгений Игоревич, Зупарова Валентина Владимировна, Зупарова Валерия Владимировна.....25

**РАЗРАБОТКА ГРАФИЧЕСКОЙ НОТАЦИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ *NOSQL* БАЗ ДАННЫХ**
Ромакина Оксана Михайловна, Арсеньева Анна Закировна,
Клемешева Анастасия Сергеевна, Зайцева Екатерина Викторовна.....32

**МЕТОД РАСЧЕТА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ**
Пышкина Ирина Сергеевна, Максимов Ярослав Александрович, Мартышкин Алексей Иванович.....43

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ СТРУКТУРЫ БАЗЫ ДАННЫХ КОМПЬЮТЕРНОГО ГЕНЕРАТОРА ИЗОБРАЖЕНИЯ В СЕГМЕНТЕ ПЕРВОГО УРОВНЯ В *3D*-МОДЕЛИ ЗОНЫ ПОЛЕТА АВИАЦИОННОГО ТРЕНАЖЁРА**
Кувшинова Ольга Александровна.....49

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРОВ КОНТАКТНОЙ ПЛОЩАДКИ НА ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ**
Вершинин Егор Андреевич, Михеев Михаил Юрьевич, Рыбаков Илья Михайлович.....55

**РАЗРАБОТКА ВЕБ-СЕРВИСА ПРОВЕРКИ АКТУАЛЬНОСТИ И ДОСТУПНОСТИ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ**
Гудков Кирилл Владимирович, Шириков Роман Сергеевич.....60

### *ПИЩЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ*

**ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРОКОЛЛОИДОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ ХЛЕБА ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА И ПРОДЛЕНИЯ СРОКОВ ЕГО ХРАНЕНИЯ**
Гулова Тамара Ивановна, Леонтьева Светлана Александровна.....69

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛУЗГИ ГРЕЧИХИ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ ВЕШЕНКИ ОБЫКНОВЕННОЙ НА СУБСТРАТАХ РАЗНОГО СОСТАВА**
Крамаренко Максим Владимирович, Киреева Наталья Васильевна.....76

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СОЛОДОРАЩЕНИЯ ПРОСА ПОСЕВНОГО (*PANICUM MILIACEUM L.*)**
Рожнов Евгений Дмитриевич, Школьникова Марина Николаевна.....81

**ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА МЯСНОГО ХЛЕБА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОДНОГО ЭКСТРАКТА БРУСНИКИ**
Табакаева Оксана Вацлавовна, Гвоздюкова Лариса Алексеевна.....86

**ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ИНГРЕДИЕНТНОГО СОСТАВА НА СОДЕРЖАНИЕ ЙОДА В ГОТОВЫХ ИЗДЕЛИЯХ ИЗ РЫБЫ**
Маюрникова Лариса Александровна, Давыденко Наталия Ивановна, Зирка Анна Юрьевна, Лаа Сайлана Радионовна.....92

**ОЦЕНКА АНТИОКСИДАНТНЫХ СВОЙСТВ НАПИТКОВ, ПРИГОТОВЛЕННЫХ ИЗ КОФЕ РАЗНЫМИ СПОСОБАМИ**
Нилова Людмила Павловна, Малютенкова Светлана Михайловна, Тверской Василий Ростиславович.....100

**МЕТОДЫ ЭКСТРАКЦИИ И МОДИФИКАЦИИ ИЗОЛЯТА ГОРОХОВОГО БЕЛКА, ВЛИЯНИЕ НА СВОЙСТВА**
Чугунова Ольга Викторовна, Бикбулатов Павел Станиславович, Заворохина Наталия Валерьевна.....106

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОРОШКА ОБЛЕПИХИ В ПРЯНИЧНЫХ ИЗДЕЛИЯХ**
Смольянова Аля Павловна, Волошина Марина Олеговна, Ломакина Полина Анатольевна.....114

**РАСЧЕТ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕМБРАННОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ СКВАШЕННОГО МОЛОКА**
Кувшинова Ольга Александровна, Кувшинов Алексей Николаевич.....120

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СУФЛЕ ИЗ МИНТАЯ, ОБОГАЩЕННОГО ПОРОШКОМ ИЗ КОРНЯ ОДУВАНЧИКА**
Королев Александр Павлович, Феофилактова Ольга Владимировна, Панкратьева Наталья Анатольевна.....126

***ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ***

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ТРУДА МАШИНИСТОВ АВТОМОТРИС ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КАК НАГРЕВАЮЩЕГО, ТАК И ОХЛАЖДАЮЩЕГО МИКРОКЛИМАТА**
Баланов Игорь Андреевич, Булыгин Юрий Игоревич, Гуменюк Алексей Сергеевич, Яицков Иван Анатольевич.....132

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ РИСКА НА ПРЕДПРИЯТИЯХ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА**
Хайруллин Руслан Зуфарович, Зубкова Аделина Дамировна, Тучкова Оксана Анатольевна, Хайруллина Ляйсан Исмагиловна.....141

**О РЕЗУЛЬТАТАХ АНАЛИЗА НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКОГО АППАРАТА В ОБЛАСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАЩИТЫ СПАСАТЕЛЕЙ**
Рыбаков Анатолий Валерьевич, Петренко Павел Павлович, Иванов Евгений Вячеславович, Мясников Денис Владимирович.....150

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НА РАБОЧИХ МЕСТАХ ПРИ ШАРИКО-СТЕРЖНЕВОМ УПРОЧНЕНИИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НЕСУЩИХ РАМ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН**
Исаев Александр Геннадьевич.....156

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНЫХ УСЛОВИЙ ТРУДА РАБОТНИКОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХОЗЯЙСТВ ПРЕДПРИЯТИЙ**
Костюков Александр Владимирович, Финоченко Татьяна Анатольевна.....161

**ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ВОДЫ В РЕКЕ УРАЛ И ЕЕ ПРИТОКАХ НА ТЕРРИТОРИИ ЗАПАДНО-КАЗАХСТАНСКОЙ ОБЛАСТИ**
Атаманова Ольга Викторовна, Тихомирова Елена Ивановна, Курмашева Гулшат Рахметуллаевна, Проказов Николай Дмитриевич.....169

**МОДЕЛИРОВАНИИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПОЖАРОТУШЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦЕПЕЙ МАРКОВА**
Танклевский Леонид Тимофеевич, Таранцев Александр Алексеевич, Балабанов Иван Дмитриевич.....175

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В КОЖУХОТРУБНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКАХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЗАПАСЕННОГО ХЛАДАГЕНТА**
Панфилов Иван Александрович.....181

**ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ПОЖАРНОГО РИСКА ДЛЯ УЧАСТКОВ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНЫХ ВЕЩЕСТВ АВТОМОБИЛЬНЫМ ТРАНСПОРТОМ**
Бызов Антон Прокопьевич, Ефремов Сергей Владимирович, Попова Яна Андреевна.....189

**ИССЛЕДОВАНИЕ УРОВНЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ И ЧЕЛОВЕКА ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ШУМА**
Мишина Кристина Дмитриевна, Безбородова Оксана Евгеньевна, Бодин Олег Николаевич, Камардина Наталья Владленовна.....196

**МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОБОСНОВАНИЮ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ПЕРСОНАЛА МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОГО КОМПЛЕКСА**
Коршунов Геннадий Иванович, Красноухова Дарья Юрьевна, Туманов Максим Валентинович.....204

**ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЗЕМЕЛЬНЫХ УЧАСТКОВ НА ОСНОВЕ ИНДИКАТОРОВ С УЧЕТОМ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ**
Баденко Владимир Львович, Федоров Михаил Петрович, Масликов Владимир Иванович, Молодкина Людмила Михайловна, Ефремова Сания Юнусовна.....210

**ОБ ОБРУШЕНИИ ДЕРЕВЯННЫХ ОПОР ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ И СВЯЗИ В ЭКСПЛУАТАЦИОННОМ ПЕРИОДЕ**
Каверзнева Татьяна Тимофеевна, Скрипник Игорь Леонидович, Сенченко Владимир Александрович, Николаева Инна Павловна.....220

**РАЗРАБОТКА БИОПЛАСТИКА НА ОСНОВЕ ХИТОЗАНА, БИОМАССЫ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ И ГЛИЦЕРИНА**
Сергеев Олег Евгеньевич, Политаева Наталья Анатольевна, Вельможина Ксения Алексеевна.....227

**ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ОЦЕНКИ ВЗРЫВОПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ПРОИЗВОДСТВА И ОБРАЩЕНИЯ ВОДОРОДСОДЕРЖАЩЕГО ГАЗА**
Тимошенко Артем Леонидович.....235

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СНИЖЕНИЯ ЗАПЫЛЕННОСТИ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ**
Коршунов Геннадий Иванович, Спицын Андрей Александрович, Онегов Никита Андреевич, Фитерман Софья Игоревна.....250

**ОЦЕНКА ПЫЛЕВОГО РЕЖИМА ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ УГОЛЬНЫХ СКЛАДОВ**
Гендлер Семен Григорьевич, Степанцова Анастасия Юрьевна, Кузнецов Владимир Сергеевич.....256

**ПРОТОТИП ТЕХНИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА ОБНАРУЖЕНИЯ ПОЖАРА, ПОСТРОЕННЫЙ НА ПРИНЦИПАХ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА**
Андреев Андрей Викторович, Доронин Александр Сергеевич, Каченкова Валерия Дмитриевна.....263

**РАЗРАБОТКА КАРТРИДЖА ДЛЯ БЫТОВОГО ФИЛЬТРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАНУЛИРОВАННОГО СОРБЕНТА ОКСИД ГРАФЕНА-ХИТОЗАН**
Челышева Валентина Павловна, Политаева Наталья Анатольевна, Молодкина Людмила Михайловна, Ефремова Сания Юнусовна.....268

## CONTENT

**Editor's column**.....10

*INFORMATION SCIENCE, COMPUTING DEVICES AND CONTROLING*

**_HDR_ TECHNOLOGY FOR SCANNING NEGATIVE AND POSITIVE FILM WITH DIGITAL POST-PROCESSING**
Kovalev Igor Vladimirovich, Blinnikov Alexander Veniaminovich.....11

**ON RANDOM NUMBER GENERATORS FOR TELECOMMUNICATIONAL DEVICES BASED ON RANDOMIZED ALGORITHMS**
Semenov Andrei Olegovich, Pyshkina Irina Sergeevna.....19

**INTEGRATION OF LANGUAGE MODELS WITH KNOWLEDGE BASES AND EXTERNAL DATA SOURCES**
Markin Evgeny Igorevich, Zuparova Valentina Vladimirovna, Zuparova Valeria Vladimirovna.....25

**DEVELOPMENT OF GRAPHICAL NOTATION FOR MODELING _NOSQL_ DATABASES**
Romakina Oksana Mikhaylovna, Arseneva Anna Zakirovna,
Klemesheva Anastasiia Sergeevna, Zaytseva Ekaterina Viktorovna.....32

**METHOD FOR CALCULATING WEB APPLICATION PERFORMANCE**
Pyshkina Irina Sergeevna, Maximov Yaroslav Alexandrovich, Martyshkin Alexey Ivanovich.....43

**DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR THE DATABASE STRUCTURE OF A COMPUTER IMAGE GENERATOR IN THE FIRST-LEVEL SEGMENT IN A _3D_ MODEL OF THE FLIGHT ZONE OF AN AVIATION SIMULATOR**
Kuvshinova Olga Alexandrovna.....49

**RESEARCH OF THE INFLUENCE OF THE CONTACT PAD DIMENSIONS ON THERMAL CONDITIONS**
Vershinin Egor Andreevich, Mikheev Mikhail Yurievich, Rybakov Il'ya Michailovich.....55

**DEVELOPMENT OF A WEB SERVICE FOR CHECKING THE RELEVANCE AND AVAILABILITY OF LITERARY SOURCES**
Gudkov Kirill Vladimirovich, Shirikov Roman Sergeevich.....60

*FOOD TECHNOLOGY*

**APPLICATION OF HYDROCOLLOIDS IN BREAD PRODUCTION TO IMPROVE QUALITY AND EXTEND ITS STORAGE LIFE**
Gulova Tamara Ivanovna, Leontyeva Svetlana Aleksandrovna.....69

**THE EFFICIENCY OF USING BUCKWHEAT HUSKS IN OYSTER MUSHROOM GROWING ON SUBSTRATES OF VARIOUS COMPOSITIONS**
Kramarenko Maksim Vladimirovich, Kireeva Natalya Vasilyevna.....76

**RESEARCH OF THE MALTING PROCESS OF MILLET (_PANICUM MILIACEUM L._)**
Rozhnov Evgeniy Dmitrievich, Shkolnikova Marina Nikolaevna.....81

**TECHNOLOGY FOR THE PRODUCTION OF MEAT LOAVES USING LINGONBERRY AQUEOUS EXTRACT**
Tabakaeva Oksana Vatslavovna, Gvozdyukova Larisa Alekseevna.....86

**STUDYING THE INFLUENCE OF INGREDIENT COMPOSITION ON IODINE CONTENT IN READY FISH PRODUCTS**
Mayurnikova Larisa Aleksandrovna, Davydenko Nataliia Ivanovna, Zirka Anna Yurievna, Laa Saylana Radionovna.....92

**ASSESSMENT OF THE ANTIOXIDANT PROPERTIES OF DRINKS BREWED FROM COFFEE BY DIFFERENT METHODS**
Nilova Liudmila Pavlovna, Malyutenkova Svetlana Michailovna, Tverskoi Vasilii Rostislavovich.....100

**METHODS OF MODIFICATION OF PEA PROTEIN ISOLATE, EFFECT ON PROPERTIES**
Chugunova Olga Viktorovna, Bikbulatov Pavel Stanislavovich, Zavorokhina Natalia Valerievna.....106

**USING OBLIBIHA POWDER IN GINGERBOOK PRODUCTS**
Smolyanova Alya Pavlovna, Voloshina Marina Olegovna, Lomakina Polina Anatolyevna.....114

**CALCULATION OF THE HYDRODYNAMIC RESISTANCE OF A MEMBRANE PLANT FOR THE CONCENTRATION OF FERMENTED MILK**
Kuvshinova Olga Aleksandrovna, Kuvshinov Aleksey Nikolaevich.....120

**DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR POLLACK SOUFFLÉ ENRICHED WITH DANDELION ROOT POWDER**
Korolev Alexander Pavlovich, Feofilaktova Olga Vladimirovna, Pankratieva Natalia Anatolievna.....126

***TECHNOSPHERE SAFETY***

**TRANSFORMATION OF ENVIRONMENTAL PARAMETERS INTO INDICATORS OF PRODUCTION RISK AT ENTERPRISES**
Balanov Igor Andreevich, Bulygin Yuri Igorevich, Gumenyuk Alexey Sergeevich, Yaitskov Ivan Anatolyevich.....132

**COMPARATIVE ANALYSIS OF APPROACHES TO RISK ASSESSMENT AT OIL AND GAS ENTERPRISES**
Khairullin Ruslan Zufarovich, Zubkova Adelina Damirovna, Tuchkova Oksana Anatolievna, Khairullina Liaisan Ismagilovna.....141

**ABOUT THE RESULTS OF ANALYSIS OF THE SCIENTIFIC AND METHODOLOGICAL APPARATUS IN THE FIELD OF PROTECTING RESCUE PROTECTION**
Rybakov Anatoly Valerievich, Petrenko Pavel Pavlovich, Ivanov Evgeny Vyacheslavovich, Myasnikov Denis Vladimirovich.....150

**EXPERIMENTAL STUDIES OF ACOUSTIC CHARACTERISTICS AT WORKPLACES DURING BALL-ROD STRENGTHENING OF WELDED JOINTS OF LOAD-BEARING FRAMES OF TRANSPORT AND AGRI-CULTURAL MACHINES**
Isaev Alexander Gennadievich.....156

**ENSURING SAFE WORKING CONDITIONS FOR EMPLOYEES OF ENERGY SECTORS OF ENTERPRISES**
Kostyukov Alexander Vladimirovich, Finochenko Tatiana Anatolievna.....161

**HYDROCHEMICAL INDICATORS OF WATER QUALITY IN THE URAL RIVER AND ITS TRIBUTARIES IN THE WEST KAZAKHSTAN REGION TERRITORY**
Atamanova Olga Viktorovna, Tikhomirova Elena Ivanovna, Kurmasheva Gulshat Rakhmetullaevna, Prokazov Nikolay Dmitrievich.....169

**APPLICATION OF MARKOV CHAINS TO THE PROBLEMS OF MAINTAINING THE READINESS OF ORGANIZATIONAL AND TECHNICAL SYSTEMS**
Tanklevsky Leonid Timofeevich, Tarantsev Alexander Alekseevich, Balabanov Ivan Dmitrievich.....175

**STUDY OF HEAT TRANSFER IN SHELL-AND-TUBE HEAT EXCHANGERS USING STORED REFRIGERANT**
Panfilov Ivan Alexandrovich.....181

**APPROACH TO ASSESSMENT OF POTENTIAL FIRE RISK FOR HAZARDOUS SUBSTANCES TRANSPORTATION SECTIONS BY ROAD TRANSPORT**
Byzov Anton Prokop'evich, Efremov Sergey Vladimirovich, Popova Iana Andreevna.....189

**INVESTIGATION OF THE ENVIRONMENTAL AND HUMAN IMPACT OF INDUSTRIAL NOISE**
Mishina Kristina Dmitrievna, Bezborodova Oksana Evgenievna, Bodin Oleg Nikolaevich, Kamardina Natalya Vladlenovna.....196

**METHODOLOGICAL APPROACHES TO SUBSTANTIATING A COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE RELIABILITY OF THE PERSONNEL OF THE MINERAL RESOURCE COMPLEX**
Korshunov Gennadiy Ivanovich, Krasnoukhova Darya Yurievna, Tumanov Maksim Valentinovich.....204

**GEOENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF LAND PLOTS BASED ON INDICATORS CONSIDERING THE UNCERTAINTY OF INITIAL DATA**
Badenko Vladimir Lvovich, Fedorov Mikhail Petrovich, Maslykov Vladimir Ivanovich, Molodkina Lyudmila Mikhailovna, Efremova Saniya Yunusovna.....210

**ABOUT THE OF WOODEN OVERHEAD LINE SUPPORTS POWER TRANSMISSIONS AND COMMUNICATIONS DURING THE OPERATIONAL PERIOD**
Kaverzneva Tatyana Timofeevna, Skripnik Igor Leonidovich, Senchenko Vladimir Alekcandrovich, Nikolaeva Inna Pavlovna.....220

**DEVELOPMENT OF BIOPLASTIC BASED ON CHITOSAN, MICROALGAE BIOMASS, AND GLYCEROL**
Sergeev Oleg Yevgenevich, Politaeva Natalya Anatolyevna, Velmozhina Ksenia Alekseevna.....227

**BASIC PRINCIPLES OF EXPLOSION AND FIRE HAZARD ASSESSMENT OF HYDROGEN GAS PRODUCTION AND HANDLING FACILITIES**
Timoshenko Artem Leonidovich.....235

**APPLICATION OF THE METHOD OF REDUCING DUST IN COAL MINES**
Korshunov Gennady Ivanovich, Spitsyn Andrey Alexandrovich, Onegov Nikita Andreevich, Fiterman Sofya Igorevna.....250

**DUST REGIME ASSESSMENT DURING THE OPERATIONS ON COAL WAREHOUSES**
Gendler Simeon Grigorievich, Stepantsova Anastasiia Yurievna, Kuznetsov Vladimir Sergeevich.....256

**PROSPECTS FOR USING NEURAL NETWORKS TO INCREASE THE RELIABILITY OF FIRE SAFETY SYSTEMS**
Andreev Andrey Viktorovich, Doronin Alexander Sergeevich, Kachenkova Valeria Dmitrievna.....263

**DEVELOPMENT OF A CARTRIDGE FOR HOUSEHOLD FILTER USING GRAPHENE OXIDE-CHITOSAN GRANULAR SORBENT**
Chelysheva Valentina Pavlovna, Politayeva Natalya Anatolyevna, Molodkina Lyudmila Mikhailovna, Efremova Sania Yunusovna.....268

***Пащенко Дмитрий Владимирович***, *доктор технических наук, профессор, почетный работник сферы образования РФ.*

*Ректор Пензенского государственного технологического университета.*



## ИННОВАЦИОННЫЕ СТРАТЕГИИ ОБРАЗОВАНИЯ В СОВРЕМЕННОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

Дорогие друзья, прошло много времени с моего авторского обращения к читателям и авторам нашего любимого журнала. В статье хочу изложить подходы к занятию наукой и высшему образованию, каким образом изменение в одном меняет на другое и как это должно гармонично сочетаться в современном технологическом университете.

В современном мире, в век перенасыщенности информацией, становится снова актуальным формулировка такого понятия, как высшее образование. В интернете много специализированных платных и бесплатных курсов по всем направлениям, необходимых будущим инженерам. Многие университетские подходы к обучению бывшим школьникам кажутся устаревшими. Кажется, стоит посмотреть ролик в YouTube, или записаться на online курс, и ты станешь профессионалом в своём деле. А уж толстые научные книги и справочники точно ушли в историю. И они пробуют. Кое-что получается, кое-что нет, но без Internet современное образование уже нельзя представить. В этой парадигме самое главное – пробует. Ученик – будущий студент начинает практическое обучение по тем шаблонам, которые заложены в роликах и уроках, начиная практическое обучение. Это очень важный шаг в выборе своей профессии и получении первой квалификации. Потом бывший школьник попадает в колледж или ВУЗ и, в отличие от своих старших товарищей, у него часто есть опыт самостоятельной учебы и работы. Мы же, как университет, получаем студента с несколько другими требованиями, чем классический школьник, который приходит в классический университет. Это безусловно и «клиповое» мышление, и требование мешать теорию и практику, нежелание читать серьёзную литературу и главное - дефицит времени и желание всё получить здесь и сейчас. Ну и конечно почти все современные студенты хотят сразу же во время учёбы зарабатывать и быть независимыми. Безусловно, не все студенты такие, но таких становится всё больше и больше.

Здесь появляется первый вызов, стоящий прежде всего перед высшим образованием – сделать быстро и качественно. Оптимально, как было раньше – сначала учеба, потом работа. Такой подход позволяет планомерно и системно готовить грамотных инженеров, выделять людей, склонных к занятию наукой, решать задачи подготовки всесторонне развитой личности. Но современный студент слишком нетерпелив и лучшие уходят в работу раньше, чем закончится обучение.

Второй вызов – это последовательность обучения. Сначала во всех учебных планах присутствуют естественнонаучные и общеобразовательные дисциплины. И только с середины второго курса появляются в значимым объеме спец дисциплины. Но никто не хочет ждать. Что же с этим делать.

В нашем университете предлагается подход, позволяющий освоить несколько квалификаций в рамках параллельных подходов к обучению. Обучаясь в специализированном дизайн центре, студенты переводятся на практикоориентированный учебный план с большой долей самостоятельного обучения. Это позволяет студенту нового типа осваивать профессию на реальных практических задачах под руководством опытных менторов. Чтобы попасть в такую лабораторию студентам приходится проходить внутренний отбор и показывать хорошие результаты при обучении. Ну и еще одна важная задача - обучающийся должен со временем становятся сотрудниками университета и заниматься наукой.

В заключении хочется сформулировать парадигму, которой должны следовать все успешные люди, стремящиеся к развитию и успеху – «Обучение в современном мире подобно тысячи маленьких шагов, которые человек делает всю свою жизнь, совершенствуясь, познавая мир и создавая будущее».

*Д.В. Пащенко*

УДК 004.932.4
EDN: ZANQYC

# ТЕХНОЛОГИЯ *HDR* СКАНИРОВАНИЯ НЕГАТИВНОЙ И ПОЗИТИВНОЙ КИНОПЛЁНКИ С ЦИФРОВОЙ ПОСТОБРАБОТКОЙ

© Автор(ы) 2024

SPIN-код: 3817-2742
AuthorID: 108176
ORCID: 0000-0003-2128-6661
ResearcherID: S-9633-2017
ScopusID: 56441027200

**КОВАЛЕВ Игорь Владимирович,** доктор технических наук,
профессор кафедры «Программная инженерия», института космических и информационных технологий
*Сибирский федеральный университет*
*(660041, Россия, Красноярск, пр. Свободный, 79, e-mail: office@sfu-kras.ru)*

SPIN: 5799-8225
AuthorID: 1141691
ORCID: 0009-0001-0022-8043
ResearcherID: KFF-5419-2024
ScopusID: 57392243900

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

**Аннотация.** Работа посвящена исследованию и изучению методов *HDR*-сканирования, основанных на двойном прохождении сканируемой киноплёнки со сменой экспозиции и применением дискретного двумерного преобразовании Фурье с узлами на центрированной решётке для более точной передачи цветов и более качественной детализации теней и бликов. В данном исследовании киноматериалы оцифровывались с использованием киносканера *Cintel Scanner C-Drive*. Были отсканированы как 35 мм, так и 16 мм киноленты, причём, как кино-негативы, так и кино-позитивы, любезно предоставленные КГАУК «Енисей кино». Киноплёнки проходили процедуру увлажнения в фильмостате специальными средствами (фильмостатные жидкости), после чего к плёнкам приклеивался дополнительный как начальный, так и финальный ракорд. Оцифрованные кино и аудио материалы проходили постобработку, цветокоррекцию и иные технические манипуляции. В практическом аспекте наиболее оптимальной для цветного и чёрно-белого *HDR* сканирования оказалась система дополнительной цветовой гаммы *Rec*.709, а так же система дополнительной цветовой гаммы *Rec*.2020. Метод объединения нескольких изображений с разной экспозицией для расширения общего динамического диапазона изображения, позволил существенно снизить энтропию и снизить шумовые характеристики.

**Ключевые слова:** сканирование киноплёнки, расширенный динамический диапазон, цифровые преобразования, сканирование в расширенном динамическом диапазоне в два прохода, цифровые сканы позитива, цифровые сканы негатива, дискретные преобразования, киноплёнка 35 мм, киноплёнка 16 мм, цифровая постобработка, киносканирование.

# *HDR* TECHNOLOGY FOR SCANNING NEGATIVE AND POSITIVE FILM WITH DIGITAL POST-PROCESSING

© The Author(s) 2024

**KOVALEV Igor Vladimirovich,** doctor of technical sciences, professor of Department of Software Engineering
*Siberian Federal University*
*(660041, Russia, Krasnoyarsk, Ave. Svobodny 79, e-mail: office@sfu-kras.ru)*
**BLINNIKOV Alexander Veniaminovich,** post-graduate student, professor of Department of Software Engineering
*Krasnoyarsk State Agrarian University*
*(660049, Russia, Krasnoyarsk, Ave. Mira 79, e-mail: info@kgau.ru)*

**Abstract.** The work is devoted to the research and study of *HDR*+ scanning methods based on the double passage of the scanned film with a change of exposure and the use of discrete two-dimensional Fourier transform with nodes on a centered lattice for more accurate color transfer and better detail of shadows and highlights. In this research, film materials were digitized using a *Cintel Scanner C-Drive*. Both 35 mm and 16 mm films were scanned, both film negatives and film positives, kindly provided by «Yenisei Cinema». The films underwent a humidification procedure in a filmostat using special means (filostat liquids), after which an additional initial and final leader was glued to the films. Digitized film and audio materials underwent post-processing, color correction and other technical manipulations. In practical terms, the most optimal system for color and black-and-white *HDR* scanning turned out to be the *Rec*.709 additional color gamut system, as well as the *Rec*.2020 additional color gamut system. The method of combining several images

with different exposures to expand the overall dynamic range of the image made it possible to significantly reduce entropy and reduce noise characteristics.

**Keywords:** film scanning, High Dynamic Range Images(*HDR*), digital conversion, two-pass *HDR* scanning, digital scans of the positive, digital scans of the negative, discrete transformations, 35 mm film, 16 mm film, digital post-processing, movie scanning.

***Для цитирования:*** *Ковалев И.В. Технология HDR сканирования негативной и позитивной киноплёнки с цифровой постобработкой / И.В. Ковалев, А.В. Блинников // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 2(66). – С. 11-18. – EDN: ZANQYC.*

**Введение.** В настоящее время, как отмечается многими исследователями (О.Э. Бабкин [1], И.А. Грачёв [3], Р.Н. Храбров [4], Т. Поули [10] и др. [4-7]), все актуальнее становится проблема методик оцифровки и сканирования исторических кино и видео материалов.

Совершенствование информационных технологий, направленных на оцифровку широкоэкранных, кашетированных и иных киноплёнок 35 мм и 16 мм [1], связано с применением в КГАУК «Енисей кино» сканеров нового поколения, которые позволяют корректно снимать с киноплёнки [2] цифровые изображения в режиме реального времени. Данная технология поддерживает метод высокого динамического диапазона (*HDR*), в том числе, и режим *HDR+*.

Высокий динамический диапазон (*HDR*) – это метод объединения нескольких изображений с разной экспозицией для расширения общего динамического диапазона изображения, что позволяет существенно снижать показатели энтропии и улучшать шумовые характеристики [3] (минимум от 8 бит различных значений яркости).

Цель данного исследования состояла в том, чтобы на практике проверить способности рабочей станции в выполнении конкретных технических задач для дальнейшего практического и коммерческого использования аппаратного комплекса в рамках выполнения текущих заданий КГАУК «Енисей кино».

В настоящее время в КГАУК «Енисей кино» можно оцифровывать широкоэкранные, кашетированные и иные киноплёнки 35 мм и 16 мм с использованием сканера нового поколения [2]. Сканер позволяет эффективно снимать с киноплёнки цифровые изображения в режиме реального времени, в том числе, в режиме *HDR+*.

**Методология.** Первый способ получения *HDR* изображений – это путь синтеза изображений. Второй способ – это комбинирование *LDR* (*Low Dynamic Range Imaging*) изображений с разной выдержкой [4]. Следует отметить еще две группы методов: градиентные и частотные методы.

Частотные методы разделяют изображение на плоскость освещенности и плоскость «отражательности». Частота изображения может быть представлена в виде дискретного двумерного преобразования Фурье с узлами на центрированной решётке [5]. Каждому изображению соответствует некое иное изображение в преобразовании Фурье. В каждой точке указан коэффициент для одного из элементов дискретного базиса Фурье. Центральная часть соответствует высоким частотам, а периферийная – низким. Поэтому можно вырезать в пространстве Фурье область высоких частот, конвертировать назад и в результате получить размытое изображение (размытие, как и фильтр Гаусса, так же применим в постобработке) [6].

Примером частотного алгоритма так же является быстрая билатеральная фильтрация (*Fast Bilateral Filtering for the Display of HDRI*). В ней выделяется плоскость освещенности и «отражательности», при этом сжимается освещенность [7].

Примером градиентного метода является *Gradient Domain HDR Compression*. С его помощью создаются насыщенные и контрастные изображения [8].

Аппаратное обеспечение HDR-сканирования: в работе киноматериалы оцифровывались с использованием киносканера *Cintel Scanner C-Drive HDR+*, внешний вид которого представлен на рисунке 1. Сканер с гладкими шкивами, резиновыми роликами для чистки от пыли и мелкодисперсионных частиц предназначен для оцифровки 35-мм и 16-мм кинопленки в реальном времени и последующего грейдинга. Цветокоррекция проводится в *DaVinci Resolve* 18.0.

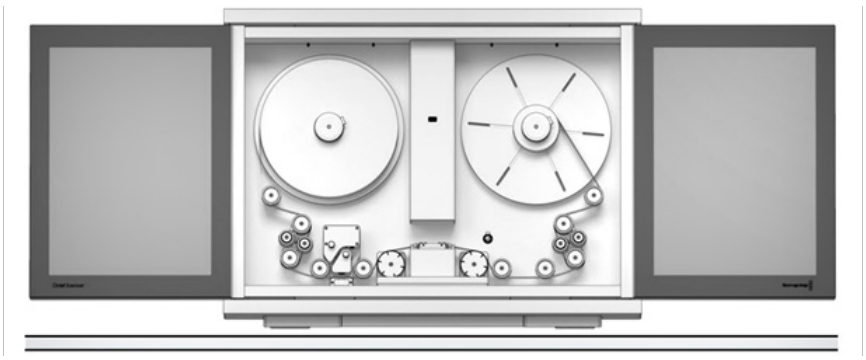


*Рисунок 1 Внешний вид сканера в рабочем состоянии*

Сканер выполняет *HDR*-сканирование в два прохода:

– сканирование при нормальной экспозиции;

– сканирование со значительно более высокой экспозицией,

чтобы получить больше деталей при слабом освещении отпечатков или бликов на кинонегативах или кинопозитивах.

Сканированные изображения с нормальной и высокой экспозициями смешиваются, в результате чего получается изображение с большей битовой глубиной.

Высокоточные элементы управления *HDR* и стабилизатор изображения выравнивают начальное сканирование и сканирование с высокой экспозицией при субпиксельной точности, используя высококачественный фильтр изменения размера, который создает *HDR*-запись, без артефактов выравнивания.

В зависимости от типа пленки возможны следующие варианты сканирования: позитивная, негативная, интерпозитивная и интернетнегативная. Сканирование *HDR* обеспечивает улучшение для всех этих типов пленок[9].

Включение двухпроходного *HDR*-сканирования предполагает многопроходную съемку с высоким динамическим диапазоном. Перед сканированием обязательным этапом является автонастройка «по-чёрному» и «по-белому» ("авточерный" или "автобелый" режим) на кадре с широким динамическим диапазоном, поскольку это определяет высокий и нормальный уровни экспозиции выбранного кадра.

Функция «автоматического черного» и «автоматического белого» анализирует текущий кадр, отображаемый в программе просмотра, и выполняет автоматическую настройку, чтобы установить точку черного для негатива и промежуточного негатива, используя область полосы кадрирования.

Для позитивной и интерпозитивной пленки при установке точки белого используется самая яркая подсветка в области изображения, поэтому важен ключевой выбор кадра. Для типов позитивных пленок кнопка «авточерный» меняется на «автобелый».

Всякий раз, когда меняется тип пленки, производится калибровка. При включении режима *HDR*, автоматически включается режим черного, и автоматическая белая калибровка сбрасывается. Индикатор состояния под кнопками «*auto black*» и «*auto white*» напоминают о необходимости повторной калибровки светодиодного источника света, чтобы обеспечить высокое качество сканирования.

*Математическое обеспечение HDR-сканирования.* Одна из наиболее «рабочих» математических моделей *HDR* [10] – это адаптивное логарифмическое отображение для контрастных сцен (*Adaptive Logarithmic mapping for Displaying High Contrast Scenes – A.L.M.F.D.H.C.S.*) [11], использующее закон Вебнера-Фехнера: «увеличение интенсивности в геометрической прогрессии вызывает увеличение чувствительности в арифметической прогрессии»:

$$L = K \cdot lg\left(\frac{I}{I_0}\right) + C, \quad (1)$$

где $I_0$ – интенсивность на нижнем пороге чувствительности; $K$ и $C$ – константы.

Закон Вебнера-Фехнера – это закон логарифмического восприятия (учитывается глобальная адаптация: ограничивается максимум выходной яркости и используются некоторые параметры сдвига).

Преобразование в алгоритме *A.L.M.F.D.H.C.S.* описывается с помощью двух формул. В начале рассчитывается статистика, затем на её основе нормируются яркости изображения, после чего используются логарифмические кривые с настраиваемым параметром $\beta$. Алгоритм упрощается за счет применения формулы к каждому пикселю:

$$L_m = exp\left(\frac{1}{N} \cdot \sum_{P \in N} ln(y_p)\right) \cdot L \cdot w = \frac{y}{L \cdot m} \quad (2)$$

$$L_\partial = \frac{L_{\partial max}}{log_{10}(L_{wmax} \cdot \frac{\frac{log(L_W+1)}{log(L_W+1)}}{log\left(2+\left(\frac{L_w}{L_{wmax}}()^{\frac{log(\beta)}{log(0,5)}}\right)()\right)})} \quad (3)$$

где первая часть есть условие подгонки, а вторая часть – условие плавности экспозиции, так как $L_{\partial max}$ – потенциальный максимум, $L_{wmax}$ – максимальное значение нормированной яркости по изображению, $\beta$ (~0,7-0,9) – регулирует отображение пикселей с низкой и средней яркостью [12].

Из 36 систем дополнительной цветовой гаммы были отобраны *Rec.*709 и *Rec.*2020, по следующим причинам:

– *Blackmagic Design, Canon, Panasonic, Red, DaVinchi, Dragon, Sony* (на долю которых пришлась 21 система) рассчитаны на соответствующую фирменную аппаратуру и преднастройки в этой аппаратуре;

– остальные 15 систем были эмпирическим путём рассмотрены ранее в работах над проектами трезвеннической тематики (оцифровки советской мультипликации «Я не курю», «Курение и дети», «Курение вредно для всех», «Тайна жёлтого куста» [19]).

*Rec.*709 – стандарт, разработанный для кодирования изображения и характеристик сигнала высокой четкости. *Rec.*709 определяет нелинейную опто-электрическую передаточную функцию (*OETF*):

$$V = \begin{cases} 4.500L & L < 0.018 \\ 1.099L^{0.45} - 0.099 & L \geq 0.018 \end{cases} \quad (4)$$

где $V$ – значение нелинейного электросигнала в диапазоне [0,1];

$L$ – линейная яркость сцены в диапазоне [0,1];

1.099 называется $\alpha$ и есть приближение $\alpha=1+5.5\beta$;

0.018 называется $\beta$;

0.099 есть $\alpha-1$;

Эти значения берутся из уравнений, необходимых для плавного слияния двух сегментов кривой:

$$\begin{cases} 4.5\beta = \alpha\beta^{0.45} - \alpha + 1 \\ 4.5 = 0.45\alpha\beta^{-0.55} \end{cases} \quad (5)$$

*OETF* по *Rec.*709 кусочно-заданная функция: линейная в нижней части, в верхней – степенная

функцию с показателем степени 0.45 для остальной части диапазона.

Обратная *OETF* по *Rec*.709 описывает преобразование значения нелинейного электрического сигнала в линейную яркость сцены:

$$L = \begin{cases} \frac{V}{4.5} & V < 0.018 \\ \left(\frac{V+0.099}{1.099}\right)^{\frac{1}{0.45}} & V \geq 0.018 \end{cases} \quad (6)$$

где $L$ – сигнал, пропорциональный интенсивности света на входе, $L'$ соответствующий нелинейный сигнал;

$\alpha$ есть приближение $\alpha=1+5.5\beta\approx1.09929682680944$;

$\beta\approx0.018053968510807$;

0.099 есть $\alpha-1$;

Эти значения берутся из уравнения (5).

*Rec*.2020 определяет нелинейную передаточную функцию для гамма-коррекции, которая является той же нелинейной передаточной функцией, которая используется в *Rec*.709, за исключением того, что параметры задаются с более высокой точностью.

$$L' = \begin{cases} 4.5L & 0 \leq L < \beta \\ \alpha L^{0.45} - (\alpha - 1) & \beta \leq L \leq 1 \end{cases} \quad (7)$$

Цвета в Rec.2020 гораздо ярче и насыщеннее, чем цвета *Rec*.709. Количество цветов в цветовом пространстве *Rec*.2020 более чем вдвое превышает *Rec*.709.

*D65* используется в стандартных источниках света, определенных международной комиссией по освещению, и приблизительно соответствует полуденному солнцу в Западной или Северной Европе [13].

**Результаты.** При *HDR* сканировании в режиме высокой интенсивности используются те же точки входа и выхода, что и при первичном сканировании, однако за счёт нескольких прогонов с изменением экспозиции размер кэша в разы увеличивается, потому достаточно важно следить за тем, чтоб не забить дисковое пространство рабочей станции. Для этого требуется вовремя кэш оптимизировать и чистить [14].

*HDR сканирование позитивной киноплёнки.* При сканировании киноплёнки в данной работе использовались как 16 мм, так 35 мм позитивные исходные материалы:

– экспонат из Ачинского музея Великой Отечественной Войны, киножурнал «За нашу Советскую Родину», 378 краснознамённая, Волховский фронт, 1943 года на 16 мм черно-белой (ЧБ) киноплёнке;

– киножурнал из киноархива братьев Абалаковых, «Советский спорт» №11 1947 года о покорении пика Коммунизма на 35 мм киноплёнке;

– документальный фильм ЦСДФ «Взлётная полоса», 1986 года на 16 мм киноплёнке с кадрами В.П. Астафьева.

Результаты сканирования представлены в таблице 1.

*HDR сканирование негативной киноплёнки.* При сканировании негативных киноплёнок использовались как чёрно-белые, так и цветные материалы 35 мм:

– киножурнал «Енисейский меридиан» №6 от 2001 года на 35 мм киноплёнке, с кадрами прощания с писателем В.П.Астафьевым;

– фильм Красноярской киностудии «Мученики и исповедники», 1994 года, на 35 мм киноплёнке, посвящённый памяти священнослужителей, погибших в период 1918-1938 годов;

– документальный фильм «Красмаш – четырежды орденоносный», 1975г на 35 мм киноплёнке.

Результаты сканирования представлены в таблице 2.

*Таблица 1 – Результаты сканирования и рендеринга позитивных исходных материалов кинофильмов на аналоговых носителях**

| Название | Хронометраж (м., с.) | Процесс | Время рендера (м., с.) |
|---|---|---|---|
| Киножурнал «Советский спорт» №11 1947г. (35 мм, ЧБ) | 10:32 | HDR Rec.2020 | 00:33:12 |
| Киножурнал «За нашу Советскую Родину», 378 краснознамённая, 1943 г. (16 мм, ЧБ) | 12:49 | HDR Rec.2020 | 00:45:28 |
| «Взлётная полоса», 1986 (16 мм, цвет) | 20:46 | HDR Rec.2020 | 01:21:15 |

* *составлено автором*

*Таблица 2 – Результаты сканирования и рендеринга негативных исходных материалов кинофильмов на аналоговых носителях**

| Название | Хронометраж (м., с.) | Процесс | Время рендера (ч., м., с.) |
|---|---|---|---|
| Киножурнал «Енисейский меридиан» №6 2001г. (35 мм, цвет и ЧБ) | 15:34 | Оба прохода в HDR Rec.2020 | 01:02:28 |
| «Мученики и исповедники», 1994 г. (35 мм, ЧБ) | 51:15 | HDR: 1-й проход в Rec.709 2-й проход в Rec.2020 | 03:01:22 |
| «Красмаш» – четырежды орденоносный, 1975г. (35 мм, ЧБ) | 6:36 | HDR: 1-й проход в Rec.709 2-й проход в Rec.2020 | 00:25:31 |

* *составлено автором*

**Обсуждение.** Графическая оценка *HDR* сканов на диаграммах цветности *CIE XYZ*:

Внешняя кривая представляет собой «диаграмму монохроматического светового пятна», диапазон длин волн составляет от 380 до 780 нм, внутренняя прямая, соединяющая два конца от 380 до 780 нм, представляет собой «фиолетовую линию».

Вся диаграмма цветности разделена на 21 определенную цветовую область, и цвета в отдельной цветовой области варьируются незначительно.

На диаграмме цветности кривая Планка, пересекающая белую область и изгибающаяся вниз – есть геометрическое место черного тела или геометрическое место Планка, которое формируется путем преобразования цвета света, соответствующего каждой температуре, горения черного тела.

Средняя область белая (все диаграмма цветности *CIE* представлены в инверсии), и чем ближе к средней белой области, тем ниже насыщенность цвета, а чем ближе к внешнему контуру границы, тем выше насыщенность цвета.

Киножурнал «Енисейский меридиан» №6 2001г. был записан как в цвете, так и со вставками черно-белых записей с применением сепии (рис. 2).

Кинофильм «Мученики и исповедники» 1994г. (рис. 3) был записан в черно-белых тонах с применением сепии. В результате двойного сканирования в 4К и просчёту получился высококачественный на 400 ГБ файл для показа на широком экране.

При последовательном использовании временного и пространственного шумоподавления в системах дополнительной цветовой гаммы *Rec*.709 и *Rec*.2020 можно наблюдать следующее:

– при временном шумоподавлении наличие нежелательного шума проверяется сразу в нескольких кадрах, поэтому детали лучше сохраняются в тех участках изображения, где движение почти отсутствует;

– успешное использование временного шумоподавления на первом этапе (даже на части изображения) позволяет уменьшить объем применяемого пространственного шумоподавления на втором этапе и тем самым улучшить общее качество конечного результата.

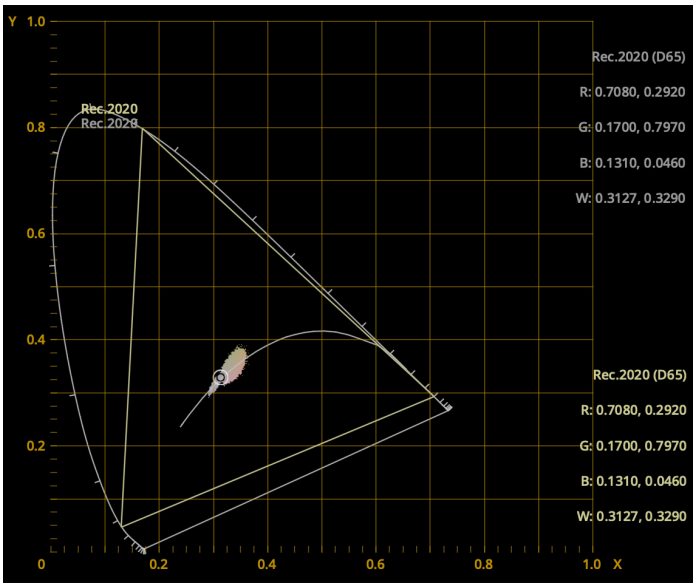



*Рисунок 2 – Диаграмма CIE совмещения кадра негатива в двойном проходе Rec.2020 киножурнала «Енисейский меридиан» №6 2001г.*

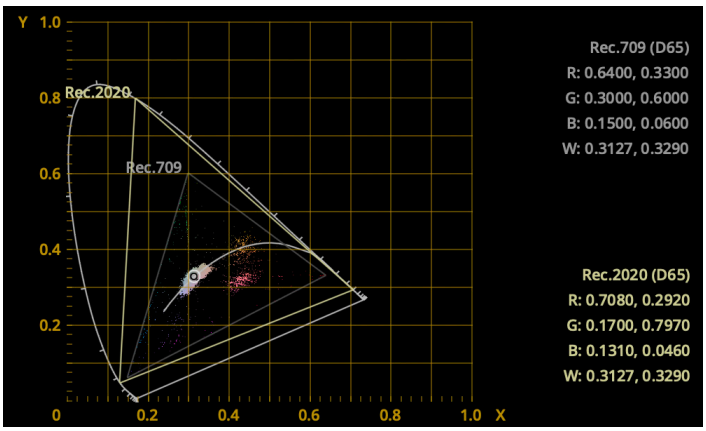



*Рисунок 3 – Диаграмма CIE совмещения кадра негатива в двойном проходе по Rec.709 и Rec.2020 фильма «Мученики и исповедники», 1994 г*

Документальный кинофильм «Красмаш» – четырежды орденоносный» полностью черно-белый, без применения сепии (рис. 4). Двойные прогоны плёнки осуществлялись в дополнительных цветовых пространствах *Rec*.709. и *Rec*.2020.

Черно-белые позитивы киноплёнок также обрабатывались в пространстве *Rec*.709 и *Rec*. 2020:

– Киножурнал «Советский спорт» №11 1947г.;

– Киножурнал «За нашу Советскую Родину», 378 краснознамённая, 1943 г.

Технология *HDR* позволяет объединять материалы с различными параметрами экспозиции. Это позволяет увеличить рамки общего диапазона и уменьшить цифровой шум. Сканирование в режиме *HDR* проводится в два прохода: сначала процесс выполняется с обычной экспозицией, а затем – с гораздо более высоким значением с целью передачи детализации в областях тени для фильмокопий или областях света для негативов. Наилучшая битовая глубина достигается при совмещении результатов после обоих проходов. Детальное описание по работе с *HDR* сканированием в два прохода представлено в мануальном руководстве *Cintel Scanner* [18].

В фильмах «Взлётная полоса», «Мученики и исповедники» и киножурнале «Енисейский меридиан» №6 за 2001г. в среднем при использовании *HDR* в два прогона, а так же при применении плагинов и *nod* для минимизации шума, исчезали 4-5 крупных артефакта (пятна), от 16 до 25 мелких пылинок и волосков, а так же до 5 царапин.

В картинах «Красмаш», киножурналах «Советский спорт» №11 1947г. «За нашу Советскую Родину», 378 краснознамённая, 1943 г. эти показатели значительно выше, так как позитивные киноплёнки были 3-й категории и степень износа исходных материалов была достаточно высокая.

Двойной проход документального фильма «Взлётная полоса» 1986 года осуществлялся в пространствах *Rec*.709 и *Rec*.2020, исходный материал был цветной (рис. 5).

Цветовая гамма, несмотря на общую красноту плёнки, позволила спектрально «вытянуть» большую часть цветов в достаточно удовлетворительном качестве.

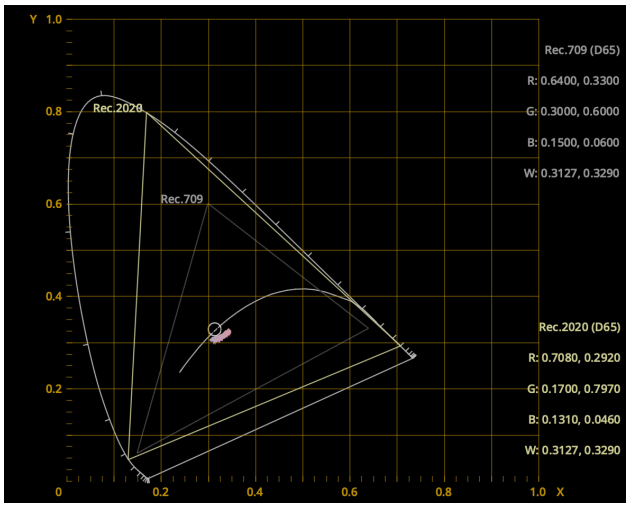



*Рисунок 4 – Диаграмма CIE негатива в двойном проходе по Rec.709 и Rec.2020 фильма «Красмаш» – четырежды орденоносный», 1975г.*

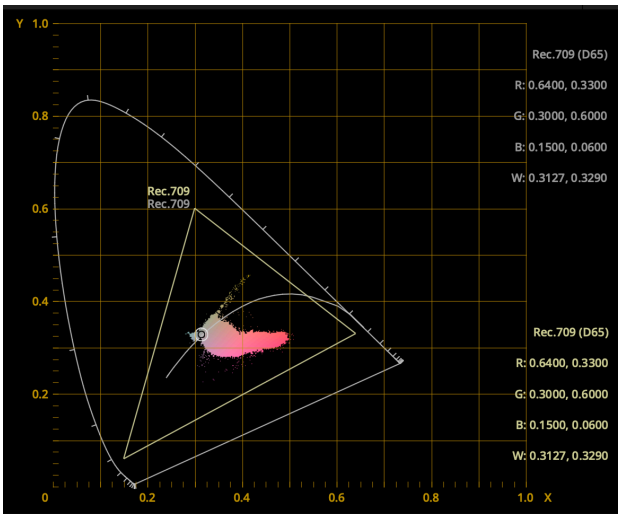



*Рисунок 5 – Диаграмма CIE совмещения кадра позитива в двойном проходе по Rec.709 и Rec.2020 фильма «Взлётная полоса», 1986 г.*

Несмотря на то, что у модели *CIE XYZ* присутствует неоднородность восприятия изменения цвета относительно расстояния на диаграмме цветности, сама модель способна наглядно визуализировать данные [15], поскольку является эталонной цветовая моделью, заданной в строгом математическом смысле организацией *CIE* (*International Commission on Illumination*).

В процессе *HDR* сканирования киноматериалов выяснилось, что для корректной работы аппаратуры дополнительно требовалось к концовке каждой частёвки приклеивать дополнительный конечный ракорд не менее 3-х метров, иначе происходила автоматическая остановка на кадрах фильмокопии и перемотка на начальную точку сканирования.

**Выводы.** *HDR* сканирование как негативных кинокопий, так и позитивных показывает значительно меньше энтропии. Полученный результат более точно передаёт цвета и показывает однозначно более качественную детализацию теней и бликов в сравнении с обычным сканированием кинокопий. *HDR* сканирование в два прохода с применением системы дополнительной цветовой гаммы *Rec*.709 и *Rec*.2020 позволило существенно улучшить качество обработки уникальных короткометражных кинодокументов [17], предоставленных КГАУК «Енисей кино».

Фильмофонды отделений КГАУК «Енисей кино» представляют интерес как для региональных, так и для федеральных исследовательских проектов, результаты *HDR* сканов на данное время уже используются для демонстраций на широком экране в краевых мероприятиях и мероприятиях федерального значения. Методики постобработки сканированных изображений постоянно совершенствуются и перспективы дальнейших изысканий в данном направлении представляются динамически устойчивыми.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Бабкин, О.Э. Реставрация архивных кинофотодокументов: фото- и кинопленки / О.Э. Бабкин, В.В. Ильина // Манускрипт. – 2016. – № 12-1(74). – С. 17-20.

2. Physical and technological approaches to systemic film moistening / I.V. Kovalev, N.A. Testoyedov, A.V. Blinnikov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series, Krasnoyarsk, Russia, 24 сентября – 03 2021 года / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Vol. Volume 2094. – Krasnoyarsk, Russia: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 22082. – DOI 10.1088/1742-6596/2094/2/022082

3. Грачева, И.А. Алгоритм сжатия динамического диапазона HDR изображений на основе фильтрации с сохранением структуры / И.А. Грачева, А.В. Копылов // Интеллектуализация обработки информации: Тезисы докладов 12-й Международной конференции, Москва, Россия – Гаэта, Италия, 08-12 октября 2018 года. – Москва, Россия - Гаэта, Италия: Общество с ограниченной ответственностью "ТОРУС ПРЕСС", 2018. – С. 110-111. – DOI 10.30826/IDP201850.

4. Храбров, Р.Н. Операторы HDR TONE MAPPING для повышения реалистичности изображения / Р.Н. Храбров // Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем: материалы Всероссийской конференции с международным участием, Москва, 18-22 апреля 2016 года / Российский университет дружбы народов. – Москва: Российский университет дружбы народов, 2016. – С. 189-190.

5. Блинников А.В. Применение двумерного дискретного преобразования Фурье с узлами на центрированной решётке при постобработке архивной кинохроники / А.В. Блинников, И.В. Ковалев // Системы управления и информационные технологии. – 2023. – № 4(94). – С. 50-53.

6. Блинников, А.В. Применение дискретных цифровых преобразований с узлами на центрированной решётке при постобработке антиникотиновой мультипликации / А.В. Блинников, И.В. Ковалев // Вызовы глобализации и развитие цифрового общества в условиях новой реальности: Сборник материалов XIII Международной научно-практической конференции, Москва, 29 декабря 2023 года. – Москва: ООО "ИРОК", 2023. – С. 107-116. – DOI 10.34755/IROK.2023.47.38.007

7. Pearl, Judea. The Book of Why: The New Science of Cause and Effect / Judea Pearl, Dana Mackenzie. – New York City: Basic Books, 2018. – 432 p.

8. Пахомова Е.А. Метод повышения качества восприятия HDR-изображений при их отображении на устройствах со стандартным динамическим диапазоном / Е.А. Пахомова, В.Д. Федоров // Телекоммуникационные и вычислительные системы 2020: Труды международной научно-технической конференции, Москва, 14-17 декабря 2020 года / Московский технический университет связи и информатики. – Москва: Научно-техническое издательство "Горячая линия-Телеком", 2020. – С. 602-609.

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

10. Pouli, T. HDR content creation: creative and technical challenges / Pouli Tania, Pines Joshua // SIGGRAPH '16: ACM SIGGRAPH 2016 Courses. – 2016. – № 14. – P. 1–82. – URL: https://dl.acm.org/doi/10.1145/2897826.2927355.

11. Украинский О.В. О применении технологии HDR в телевизионном вещании / О.В. Украинский // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2022): Сборник научных трудов XI Международной научно-технической и научно-методической конференции. В 4-х томах, Санкт-Петербург, 15-16 февраля 2022 года / Под. редакцией А.В. Шестакова, сост. В.С. Елагин, Е.А. Аникевич. Том 3. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2022. – С. 397-401.

12. Формирование High-Dynamic Range Image по цифровым фотографиям / В. Ин, И.С. Потемин, Д.Д. Жданов, В. Хи-Янг // Графикон'2016: Труды 26-й Международной научной конференции, Нижний Новгород, 19-23 сентября 2016 года. – Нижний Новгород: Автономная некоммерческая организация "Институт физико-технической информатики", 2016. – С. 238-242.

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

14. Quality assessment of HDR/WCG images using HDR uniform color spaces / M. Rousselot, X. Ducloux, O. Le Meur, R. Cozot // Journal of Imaging. – 2019. – Vol. 5, No. 1. – P. 18. – DOI 10.3390/jimaging5010018.

15. Image Quality Evaluation in Professional HDR/WCG Production Questions the Need for HDR Metrics / Ya. Sugito, Ja. Vazquez-Corral, T. Canham, M. Bertalmio // IEEE Transactions on Image Processing. – 2022. – Vol. 31. – P. 5163-5177. – DOI 10.1109/tip.2022.3190706.

16. LA-HDR: Light Adaptive HDR Reconstruction Framework for Single LDR Image Considering Varied Light Conditions / X. Hu, L. Shen, M. Jiang [et al.] // IEEE Transactions on Multimedia. – 2023. – Vol. 25. – P. 4814-4829. – DOI 10.1109/tmm.2022.3183404.

17. Глебова, И.С. Развитие экранных искусств и их влияние на аудиовизуальное образование / И.С. Глебова // Наука телевидения. – 2017. – № 13.3. – С. 33-42.

18. Cintel Scanner Installation and Operation Manual / Grant Petty // Blackmagic Design Pty. Ltd. – November 2022. – 1271 p.

19. Блинников, А.В. Применение дискретных цифровых преобразований с узлами на центрированной решётке при постобработке антиникотиновой мультипликации / А.В. Блинников, И.В. Ковалев // Вызовы глобализации и развитие цифрового общества в условиях новой реальности: Сборник материалов XIII Международной научно-практической конференции, Москва, 29 декабря 2023 года. – Москва: ООО "ИРОК", 2023. – С. 107-116. – DOI 10.34755/IROK.2023.47.38.007. – EDN XYRHXR.

*Статья поступила в редакцию 10.04.2024*
*Статья принята к публикации 17.06.2024*

УДК 005.7
EDN: ZLTFUE

# О ДАТЧИКАХ СЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ В СЕТЕВЫХ УСТРОЙСТВАХ НА БАЗЕ РАНДОМИЗИРОВАННЫХ АЛГОРИТМОВ

© Авторы 2024
SPIN: 8706-6920
AuthorID: 1000150
ORCID:0009-0001-8838-5181
**СЕМЕНОВ Андрей Олегович,** старший преподаватель кафедры «Вычислительная техника»
*Пензенский государственный университет*
*(440000, Россия, Пенза, улица Красная, 40, e-mail: andre20071@yandex.ru)*
SPIN: 3992-6024
AuthorID: 754564
ORCID: 0009-0002-2952-4302
**ПЫШКИНА Ирина Сергеевна,** кандидат технических наук,
доцент кафедры «Информационно-вычислительные системы»
*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*
*(440028, Россия, Пенза, улица Германа Титова, 28, e-mail: glazycheese@gmail.com)*

**Аннотация.** Объектом исследования являются современные телекоммуникационные устройства (коммутаторы и маршрутизаторы). Предметом исследования являются блоки выбора очередей в системах рандомизированной диспетчеризации современных телекоммуникационных устройств. Цель работы – создание методики, обеспечивающей коммутацию пакетов в контексте недетерминированной дисциплины диспетчеризации, удовлетворяющей требованиям обеспечения качества обслуживания. Настоящая работа посвящена технологии коммутации в сетевых устройствах на базе рандомизированных алгоритмов, а также оценке эффективности работы датчика случайных чисел в составе устройства диспетчеризации очередей. В настоящей работе предлагается для коммутации пакетов сетевыми устройствами использовать датчик случайных чисел определённой спецификации. На базе прототипических решений представлены результаты работы базового модуля вышеназванного датчика, который можно модифицировать в соответствии с требованиями адаптивности и модульности. В ходе моделирования для аппаратной реализации стохастического диспетчера также была проверена гипотеза о допустимости отклонений наблюдаемых количеств обслуживания для каждой из очередей диспетчера от ожидаемых значений той же величины.

**Ключевые слова:** стохастическая диспетчеризация, системы массового обслуживания, *Simulink*, моделирование, очередь, коммутатор, качество обслуживания, *CPN* Tools, проверка гипотез.

# ON RANDOM NUMBER GENERATORS FOR TELECOMMUNICATIONAL DEVICES BASED ON RANDOMIZED ALGORITHMS

© The Authors 2024
**SEMENOV Andrei Olegovich,** senior lecturer of the department of «Computer Engineering»
*Penza State University*
*(440000, Russia, Penza, building 40, Krasnaya str., e-mail: andre20071@yandex.ru)*
**PYSHKINA Irina Sergeevna,** candidate of engineering sciences,
associate professor of department of «Information-Computing Systems»
*Penza State University of Architecture and Construction*
*(440028, Russia, Penza, building 28, German Titov str., e-mail: glazycheese@gmail.com)*

**Abstract.** The research deals with modern telecommunicational devices (switches and routers). The subject of research is a queue choice subsystem for randomized scheduling in modern telecommunicational devices. The purpose of the study is the creation of dispatching discipline that meets the requirements of QoS and the lack of determinism. Current work is dedicated to scheduling for switching network devices which is based on randomized algorithms; also dedicated to the switch PRNGs work efficiency estimating. It is proposed to use ASIC based PRNG to reach appropriative QoS parameters. Resuts of modelling of main module being based on prototypical solutions are presented in current article. This module can be modified in respect to requirements of adaptability and ability to rebuild devices as number of modules. While modelling it was approved hypotheses on admissibility of deviation of service quantities for each queue.

**Keywords**: stochastic dispatching system, queuing system, simulation system, *Simulink*, *CPN* Tools, modeling, queue, switch, router, QoS, hypothesis checkup.

***Для цитирования:*** *Семенов А.О. О датчиках случайных чисел в сетевых устройствах на базе рандомизированных алгоритмов / А.О. Семенов, И.С. Пышкина // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 2(66). – С. 19-24. – EDN: ZLTFUE.*

**Введение.** Сглаживание трафика является важнейшим инструментом обеспечения качества обслуживания конечных потребителей. В свою очередь, сетевой трафик, обладая ограниченным набором количественных характеристик, поддаётся процессу формализации критериев, положенных в обобщённое понятие качества обслуживания. Оптимизация критериев качества обслуживания достигается за счёт множества различных механизмов. Одним из таких механизмов является разделение времени монопольного владения каналами с помощью диспетчеров, входящих в состав коммуникационных устройств второго/третьего уровня модели *OSI*, таких как циклические, приоритетные диспетчеры, диспетчеры реального времени и другие известные разновидности [1-4].

Недостатками классических диспетчеров является неконтролируемая величина количественных показателей качества обслуживания (*QoS*) конечного клиента [5-9]. Существует набор неклассических способов адаптивного управления такими параметрами качества обслуживания как разброс задержек, фазовое дрожание, доля потерянных пакетов и т.д. путём как канонического, так и неканонического способов распределения канального времени между блоками передаваемых данных (кадрами/пакетами) с различными предельными требованиями в части критериев качества обслуживания. Однако, существующие неканонические способы диспетчеризации, например, реального времени, обладают недостатками в части повышенных средних значений доли потерянных пакетов/кадров; в то время как многие другие неканонические способы основаны на модификациях циклических дисциплин обслуживания, недостатки которых отмечены выше [10-13]. Существует также способ, основанный на использовании блока диспетчеризации на базе рандомизированного алгоритма, не наследующий недостатков классических алгоритмов диспетчеризации [9].

В работе [9] рассматривался способ стохастической диспетчеризации очередей в коммутаторах и устройство, его реализующее, на функциональном уровне. Вопросы достижения целевых показателей математических моделей стохастического диспетчера обсуждались в [5-6]. Однако, эффективность всего устройства коммутации непосредственно зависит функционально от свойств генератора номера обслуживаемой очереди и структурно от принципиальной схемы аппаратной реализации.

**Методология.** Цель, поставленная в данной статье, заключается в схемотехнической реализации такого датчика случайных чисел, который удовлетворял бы архитектуре коммутатора, в основе работы которого лежит принцип математической модели стохастического диспетчера. Также целью данной работы является проверка гипотезы о допустимости отклонений наблюдаемых количеств обслуживания для каждой из очередей диспетчера от ожидаемых значений той же величины.

В работе [5] заданы концептуальные основы построения стохастических диспетчеров для телекоммуникационных устройств третьего уровня модели *OSI*. В данной же работе изложены детализированные аппаратные и алгоритмические принципы построения стохастических диспетчеров. Суть схемотехнической реализации состоит в:

1) выборке значений базовых критериев качества обслуживания (данные по задержкам, джиттеру, доля потерянных кадров/пакетов, скорость передачи данных) и производных величин (длины очередей, количества обслуживания и т.д.); использовании сумматоров, выборке нормированных значений $r_i$ генератора псевдослучайных чисел;

2) использовании набора умножителей и сумматоров для подсчёта числовых критериев $c_i$ приоритета выборки из *i*-той очереди как функции базовых критериев *QoS* и производных от них величин; использование умножителей с целью масштабирования и нормализации критериев так, что сумма нормализованных критериев равна некоей константе, например, единице;

3) использовании кумулятивных критериев $S_i$ по принципу $s_i = \sum_{j=0}^{i} f_j$;

4) использовании сумматоров для подсчёта разности $r_i - s_i$;

5) использовании цифровых компараторов и иной комбинационной логики для выявления наименьшей по модулю отрицательной разности $r_i - s_i$;

6) на основе критерия знакоотрицательности осуществляется выборка кадров/пакетов лишь из одной очереди, согласно заранее заданному шаблону распределения вероятностей или, другими словами, согласно ожидаемому шаблону распределения полос пропускания по каждой из очередей, т.е. для каждого класса обслуживания (*CoS*).

В исследовании задействован инструментарий математической логики, математической статистики, программных средств семейства *MatLab/Simulink*.

Функционально в состав вторичного датчика случайных чисел на этапе разработки заложены два основных принципа систем на базе рандомизированных алгоритмов, а именно: принцип случайного доступа к каналу и адаптивность к критериям *QoS*. Структура устройства диспетчеризации на основе этих принципов представлена на рисунке 1. На изображении показана модель датчика, сконструированная в системе имитационного моделирования *MatLab/Simulink*. Структура датчика подразумевает наличие следующих подсистем:

1. Узел подсчёта вероятностей (в диапазоне значений [0;1]) выборки, включающий в себя (рис. 2):

– узел проверки подсчитанных критериев $c_i$ на корректность;

– узлы деления (делители), осуществляющие операцию типа;

$$f_i = \frac{c_i}{\sum_i c_i} \quad (1)$$

Формула (1) предназначена для подсчёта доли *i*-ого критерия от суммы всех критериев.

– узел нормализации входных аргументов, обеспечивающий вычисление функции *i*-ого критерия:

$$c_i(x_1, \dots, x_n) \quad (2)$$

2. Узлы, нормирующие умножители (преобразующие, в случае необходимости, значения $f_i$ к диапазону значений [*0; m*]).

3. Кумулятирующие сумматоры, осуществляющие операцию:

$$S_i = \sum_{j=0}^{i} f_j \quad (3)$$

4. Сумматоры знакоотрицания, осуществляющие операцию типа:

$$d_i = s_i - r_i \quad (4)$$

где $r_i$ – это случайное число в диапазоне [*0; m*].

5. Цифровые компараторы (подтверждение или опровержение знакоотрицательности значений $d_i$).

6. Комбинационная логика, предотвращающая доступ к критическому ресурсу.

7. Комбинационная логика, предотвращающая доступ к критическому ресурсу.

8. Узел, хранящий константу m.

9. Вход фронтовой синхронизации.

10. Выходные порты.

11. Входные порты.

12. Средство отладки.

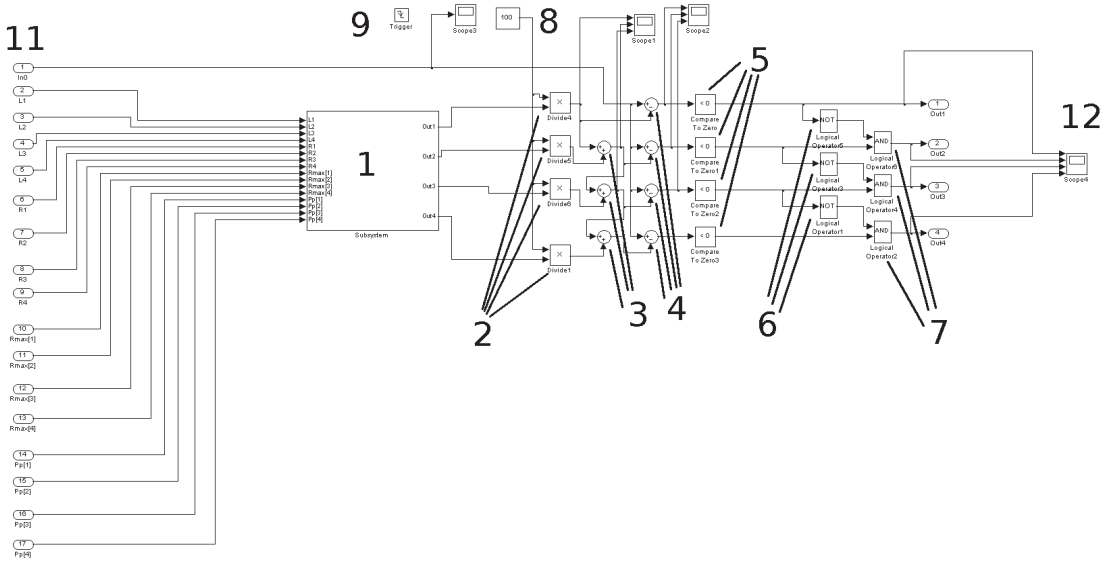



*Рисунок 1 – Верхний уровень иерархии модели датчика случайных чисел*

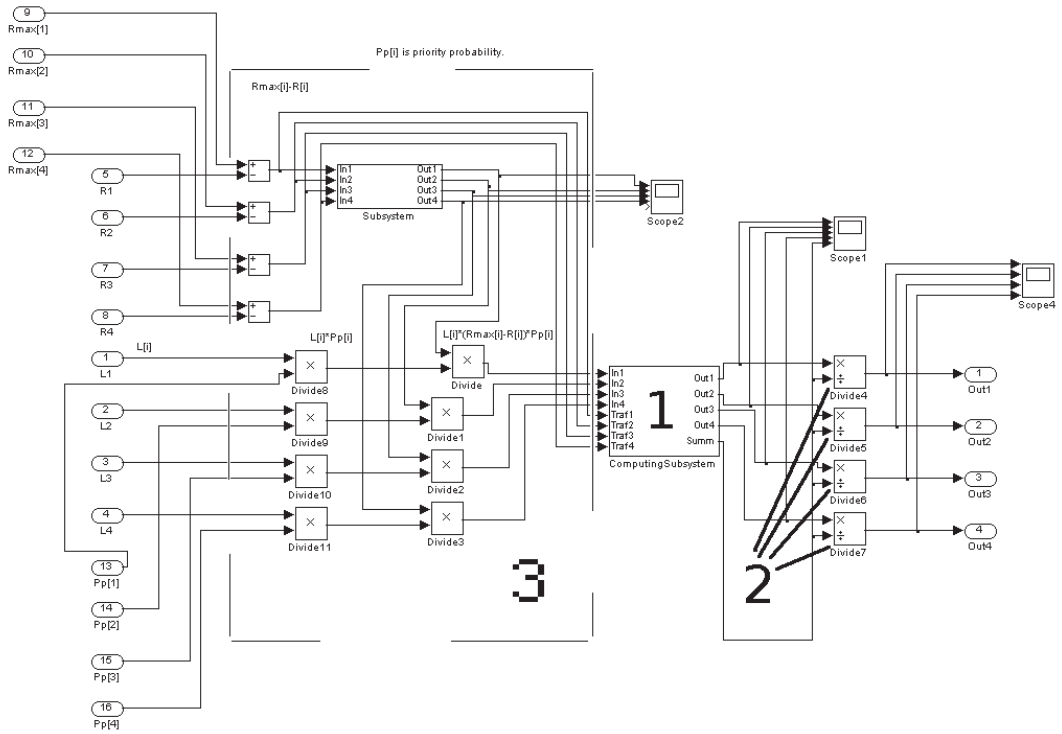



*Рисунок 2 – Верхний уровень иерархии модели узла подсчёта вероятностей*

Функциональное описание процедуры выбора очереди с помощью датчика случайных чисел приведено в виде схемы алгоритма на рисунке 3. Процедура запускается периодически, при возникновении необходимости подсчёта номера очереди. Каждый шаг процедуры пронумерован, отображён в списке ниже и соответствует нумерации на рисунке 3.

1 – Ввод значений случайного числа *Rand*, длин очередей, фактических и номинальных количеств обслуживания, значений вероятности приоритета;

2 – подсчёт вероятности выбора *i*-той очереди на обслуживание;

3 – подсчёт суммы вероятностей выбора очередей на обслуживание с номерами от 0 до *I*, включительно;

4 – сравнение на знакоотрицательность разности;

5 – вывод сигналов разрешения обслуживания *i*-той очереди, запрета обслуживания остальным очередям.

Кроме того, на рисунке 4 представлена сетевая модель датчика [14-23]. Числами отмечены состояния и переходы, ассоциированные с исполнением следующих процедур:

1. Подсчёт критерия;
2. Суммирование критериев;
3. Подсчёт доли *i*-ого критерия от суммы критериев;
4. Подсчёт разности нормированной доли и случайного числа *nRand*;
5. Подсчёт номера обслуживаемой очереди;
6. Входы датчика;
7. Выходы датчика.

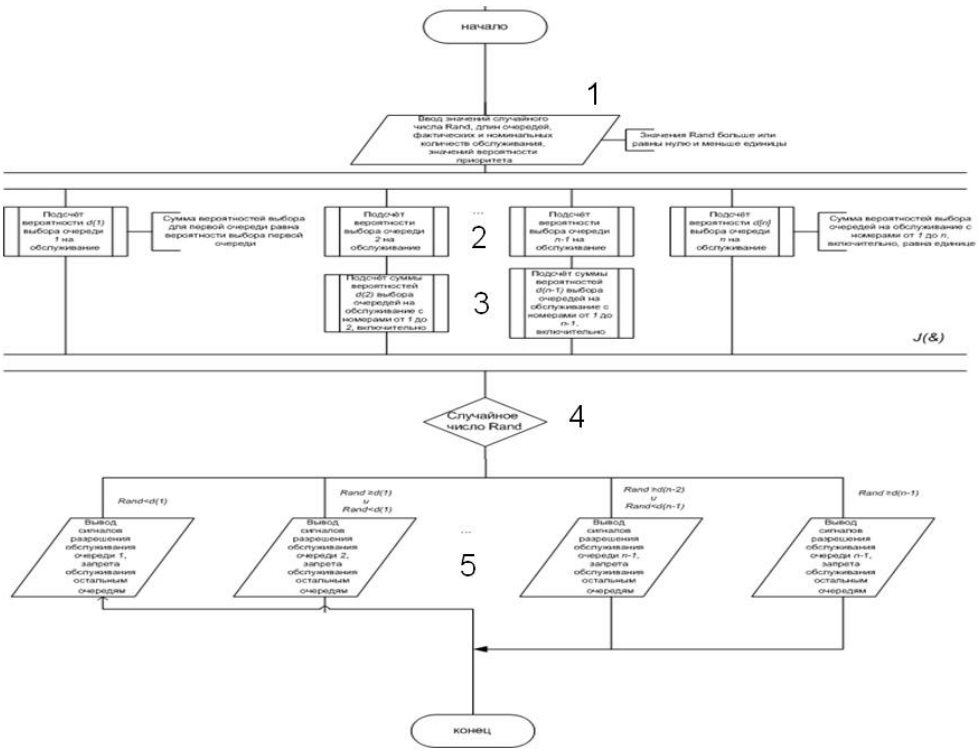



*Рисунок 3 – Функциональное описание алгоритма работы датчика случайных чисел*

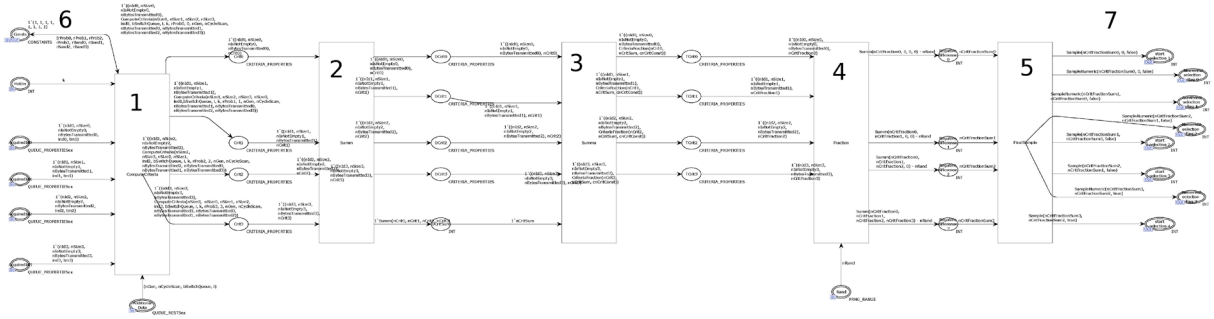



*Рисунок 4 – Верхний уровень иерархии модели сети Петри датчика случайных чисел*

**Результаты.** Поведенческие характеристики представленных моделей проверялись средствами имитационного моделирования. В таблице 1 показаны объёмы выборок для каждой очереди (столбцы *X0, X1, X2, X3*, отражающие объёмы выбора 0-ой, 1-ой, 2-ой и 3-ей очередей, соответственно) и для каждой входной комбинации непустых очередей (строки 0011, 0101 и т. д., отражающие объёмы выбора 0-ой, 1-ой, 2-ой и 3-ей очередей, соответственно), а также представлено значение критерия *q*. В ходе моделирования также проверялась гипотеза о допустимости отклонений ко-

личеств обслуживания для каждой из очередей. Для проверки гипотезы о равномерности распределения использовался широко известный, т.н. критерий соответствия *хи*-квадрат.

В качестве уровня значимости было выбрано значение $q>0.05$. Такое значение выбрано как наиболее распространённое и фактически стандартное в научных исследованиях.

*Таблица 1 – Распределение долей количеств обслуживания*

| Input set | Output set | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | X0 | X1 | X2 | X3 | q (q>0.05) |
| «0011» | 0 | 0 | 7 | 9 | 0,617075 |
| «0101» | 0 | 20 | 0 | 18 | 0,745603 |
| «0110» | 0 | 51 | 57 | 0 | 0,563703 |
| «0111» | 0 | 18 | 14 | 10 | 0,318907 |
| «1001» | 44 | 0 | 0 | 43 | 0,914621 |
| «1010» | 87 | 0 | 93 | 0 | 0,654721 |
| «1011» | 25 | 0 | 26 | 25 | 0,986928 |
| «1100» | 233 | 227 | 0 | 0 | 0,779668 |
| «1101» | 48 | 46 | 0 | 53 | 0,766971 |
| «1110» | 201 | 175 | 183 | 0 | 0,386084 |
| «1111» | 65 | 60 | 70 | 71 | 0,761608 |

**Обсуждение.** Согласно представленным данным, подтверждается гипотеза о соответствии распределений вероятностей выборок пакетов/кадров из разных очередей с целью занятия критического ресурса - канального времени выходного порта устройства – равномерному шаблону распределения величин для случая схемотехнического решения датчика случайных чисел, что не противоречит наблюдаемым данным.

**Выводы.** Предложено решение, реализующее алгоритмы динамической стохастической диспетчеризации. Приведены различные способы построения датчиков случайных чисел в сетевых устройствах на базе рандомизированных алгоритмов. Проведено моделирование датчика. Согласно представленным данным, гипотеза о соответствии распределения шаблону, соответствующему доле полосы пропускания, не противоречит наблюдаемым данным.

Возможно совершенствование данной модели с целью обеспечения безынерционности диспетчеризации сетевого трафика.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. 4-е изд. – СПБ: Изд-во “Питер”. – 2010. – С. 943.

2. Е.А. Кучерявый Управление трафиком и качество обслуживания в сети Интернет. СПБ: Изд-во “Наука и Техника”. – 2004. – С. 336.

3. Blazewicz J., Ecker K., Pesch E., Schmidt G., Weglarz J. Handbook on Scheduling from Scheduling to Applications. – Springer, 2007. – 654 pp.

4. Barreiros, M., Lundqvist, P. QoS-enabled networks tools and foundations - M. Barreiros, P. Lundqvist. John Wiley & Sons, 2016. – 254 p.

5. Семенов А.О., Коннов Н.Н., Гурин Е.И. Об использовании алгоритмов стохастической диспетчеризации очередей в сетевом коммутаторе / Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – №4. – 2018. – С. 105-117

6. Коннов Н.Н., Семенов А.О. Стохастический подход к диспетчеризации очередей в коммутаторах – Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – №3 (39). – С. 72-83.

7. Семенов, А.О. Стохастический подход к диспетчеризации очередей / А.О. Семенов // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: сб. ст. XII Междунар науч.-техн. конф. (г. Курск, 12-16 мая 2015 г.). – Курск: ЮЗГУ, 2015. – С. 331-333.

8. Семенов А.О. Имитационная модель устройства, реализующего стохастическую диспетчеризацию очередей коммутатора /Семенов А.О. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, заявка №2017663456.

9. Семенов А.О., Коннов Н.Н., Пащенко Д.В. Трокоз Д.А. Способ стохастической диспетчеризации очередей коммутатора и устройство, его реализующее. Патент РФ на изобретение № 2684581. Дата регистрации 09.04.2019

10. Кизилов Е.А. Алгоритмы и модели диспетчеризации очередей в компьютерных сетях с поддержкой качества обслуживания: дис. … канд. тех. наук: 05.13.13 / Кизилов Евгений Александрович – Пенза, 2017. – 149 с.

11. Кизилов Е.А. Моделирование адаптивной диспетчеризации очередей в коммутаторе с поддержкой QoS / Е.А. Кизилов, Н.Н. Коннов, Д.В. Патунин // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. Научно-информационный журнал, 2017. – N. 2 (22) – С. 170-183.

12. Patent EP 1887742 A1 System and process for QOS-based packet scheduling – [https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?FT=D&date=20120208&DB=&locale=en_EP&CC=EP&NR=1887742B1&KC=B1&ND=4#]

13. Patent 5,247,677 U.S. Stochastic priority-based task scheduler / Welland et al. (1993). - [http://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect2=PTO1&Sect2=HITOFF&p=1&u=/netahtml/PTO/search-bool.html&r=1&f=G&I=50&d=PALL&RefSrch=yes&Query=PN/5247677].

14. Jensen K. Colored Petri Nets-Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use. – Springer-Verlag, 1997. – Vol. 1-3. – 673 p.

15. Konnov, N., Semenov, A., Patunin, D. Analysis of Dynamical Queue Scheduling Algorythm with Service Loop Duration Restriction for Network Services / Moscow Workshop on Engineering Management of Communication and Technology, EMCTECH 2020 – Proceedings, 2020, DOI: 10.1109/EMCTECH49634.2020.9261540

16. Kizilov, E., Konnov, N., Pashchenko, D., Trokoz, D.Modelling of QoS in the industrial Ethernet switches / 2015 The 5th International Workshop on Computer Science and Engineering - Information Processing and Control Engineering (WCSE 2015-IPCE). April 15-17, 2015, Moscow, Russia. – P. 185-190.

17. Kizilov Evgeniy, Konnov Nicolas, Nikishin Kirill, Pashchenko Dmitry, Trokoz Dmitriy. Scheduling queues in the Ethernet switch, considering the waiting time of frames / MATEC Web of Conferences Vol. 44 (2016), Pages 01011-p.1-01011-p.5.

18. Зайцев Д.А., Шмелева Т.Р. Моделирование телекоммуникационных систем в CPN Tools. - Одесса, Одесская на-

циональная академия связи им. А.С. Попова. – 2008. – С. 68.

19. Никишин К.И., Коннов Н.Н. Генератор трафика Ethernet на основе цветных сетей Петри / Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе, Вып. №1 (17) 2016. – С. 299-307.

20. Кизилов Е.А., Коннов Н.Н., Патунин Д.В. Моделирование адаптивной диспетчеризации очередей в коммутаторе с поддержкой QoS / Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2017. – №2 (22). – С. 222-236.

21. Кизилов Е.А., Коннов Н.Н., Патунин Д.В. Эффективность "дефицитных" алгоритмов диспетчеризации очередей в коммутаторах с поддержкой QoS. // Информатика: проблемы, методология, технологии. Сборник материалов XVII международной научно-методической конференции: в 5 т. 2017. Издательство: Общество с ограниченной ответственностью "Вэлборн" (Воронеж). – С. 95-100.

22. Патунин Д.В. Анализ циклических алгоритмов диспетчеризации очередей с ограничением длительности сеанса обслуживания в сетевых коммутаторах. // Новые информационные технологии и системы – 2021. Сборник научных трудов конференции. – С. 128-132.

23. Семенов А.О., Конов Н.Н. Моделирование алгоритма стохастической диспетчеризации очередей в пакете MatLab/ Simulink. Новые информационные технологии и системы – 2018. Сборник научных трудов конференции. – С. 133-135.

*Статья поступила в редакцию 03.04.2024*
*Статья принята к публикации 17.06.2024*

УДК 004.89
EDN: ERACUE

# ИНТЕГРАЦИЯ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ С БАЗАМИ ЗНАНИЙ И ВНЕШНИМИ ИСТОЧНИКАМИ ДАННЫХ

© Авторы 2024
SPIN: 8289-2240
AuthorID: 902109
ORCID: 0000-0003-4848-8757
**МАРКИН Евгений Игоревич,** кандидат технических наук, доцент кафедры «Программирование»
*Пензенский государственный технологический университет*
*(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11, e-mail: edifiels@penzgtu.ru)*
SPIN: 1425-6743
AuthorID: 1068622
ORCID: 0000-0002-7903-083X
**ЗУПАРОВА Валентина Владимировна,** ассистент кафедры «Программирование»
*Пензенский государственный технологический университет*
*(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11, e-mail: zuparova@penzgtu.ru)*
SPIN: 1107-6723
AuthorID: 1249701
ORCID: 0009-0009-3623-6326
**ЗУПАРОВА Валерия Владимировна,** магистрант кафедры «Программирование»
*Пензенский государственный технологический университет*
*(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11, e-mail: zuparovavv@penzgtu.ru)*

**Аннотация.** В статье рассматриваются методы интеграции больших языковых моделей (*LLM*) с базами знаний и внешними источниками данных для повышения точности и релевантности ответов на запросы пользователей в специализированных областях знаний. Особое внимание уделено архитектуре *Retrieval-Augmented Generation* (*RAG*), которая объединяет генеративные модели с механизмами извлечения информации. Приводится пример разработки и внедрения автоматизированной информационной системы в Пензенском государственном техническом университете (ПензГТУ), интегрирующей *LLM* модели *GigaChat*, *YandexGPT* и *Claude* с внутренними и внешними базами данных. Описывается процесс сбора, нарезки и векторизации данных для формирования базы знаний. Экспериментальные результаты демонстрируют высокую точность и релевантность ответов, полученных с использованием архитектуры *RAG*, и подтверждают конкурентоспособность отечественных моделей по сравнению с зарубежными аналогами. Обсуждаются возможности и ограничения существующих подходов, а также перспективы дальнейшего развития и применения *LLM* в различных областях.

**Ключевые слова:** большие языковые модели, интеграция баз знаний, *Retrieval-Augmented Generation*, базы знаний, *GigaChat*, *YandexGPT*, *Claude*, информационные системы.

# INTEGRATION OF LANGUAGE MODELS WITH KNOWLEDGE BASES AND EXTERNAL DATA SOURCES

© The Authors 2024
**MARKIN Evgeny Igorevich,** candidate of technical sciences,
associate professor of the Department «Programming»
*Penza State Technological University*
*(440039, Penza, Baydukov passage / Gagarina Street, 1a / 11, e-mail: edifiels@penzgtu.ru)*
**ZUPAROVA Valentina Vladimirovna,** assistant of the Department «Programming»
*Penza State Technological University*
*(440039, Penza, Baydukov passage / Gagarina Street, 1a / 11, e-mail: zuparova@penzgtu.ru)*
**ZUPAROVA Valeria Vladimirovna,** master student of the Department «Programming»
*Penza State Technological University*
*(440039, Penza, Baydukov passage / Gagarina Street, 1a / 11, e-mail: zuparovavv@penzgtu.ru)*

**Abstract.** The paper discusses methods of integrating large language models (LLMs) with knowledge bases and external data sources to improve the accuracy and relevance of answers to user queries in specialized knowledge domains. Special attention is paid to *Retrieval-Augmented Generation* (*RAG*) architecture, which combines generative models with information extraction mechanisms. An example of development and implementation of an automated information system at Penza State Technical University (PenzSTU) integrating *LLM* models *GigaChat*, *YandexGP* and *Claude* with internal and external databases is presented. The process of data collection, slicing and vectorization for knowledge base generation is described. Experimental results demonstrate high accuracy and relevance of answers obtained using *RAG* architecture and confirm the competitiveness of domestic models compared to foreign analogs. The possibilities and limitations of existing approaches, as well as the prospects for further development and application of *LLM* in various

fields are discussed.

**Keywords:** large language models, knowledge base integration, Retrieval-Augmented Generation, knowledge bases, GigaChat, YandexGPT, Claude, information systems.

***Для цитирования:*** *Маркин Е.И. Интеграция языковых моделей с базами знаний и внешними источниками данных / Е.И. Маркин, В.В. Зупарова, В.В. Зупарова // XXI век:итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 2(66). – С. 25-31. – EDN: ERACUE.*

**Введение.** В последние годы активное развитие искусственного интеллекта и, в частности, языковых моделей, привело к значительным изменениям в способах обработки и анализа информации [1]. Языковые модели, такие как *GPT* (*Generative Pretrained Transformer*) и его аналоги, показали свою эффективность в решении широкого спектра задач, от автоматического создания текстов до комплексного понимания естественного языка. Однако, несмотря на их высокую производительность в контексте общего понимания языка, эти модели сталкиваются с ограничениями при работе с задачами, требующими специализированных знаний или контекстуализированных данных [2].

Основной проблемой является тот факт, что большинство мощных языковых моделей обучены на общедоступных текстовых данных, что делает их малоэффективными при работе с доменно-специфичной информацией или при необходимости интеграции с закрытыми базами данных. Эта проблематика актуализируется в задачах, где требуется точное и актуальное извлечение знаний, например, в образовательной сфере, медицине, юриспруденции и других областях.

Одним из методов решения проблемы работы с доменно-специфичной информацией является интеграция языковых моделей с базами знаний и внешними источниками данных [3]. Этот подход позволяет моделям использовать специфические данные в реальном времени, тем самым значительно повышая качество и релевантность ответов. Одним из наиболее перспективных методов интеграции является использование архитектуры Retrieval-Augmented Generation (*RAG*) [4], которая объединяет генеративные модели с механизмами извлечения информации. RAG позволяет динамически подключать внешние базы данных в процесс генерации ответа, используя векторизацию для поиска наиболее релевантных фрагментов данных.

В Пензенском государственном техническом университете актуальной задачей является создание автоматизированной информационной системы, способной агрегировать разнообразные источники данных университета (часто задаваемые вопросы (*FAQ*), сведения об образовательной организации, информацию с сайта приемной комиссии и реестр локальных актов) с современными языковыми моделями. Особое внимание следует уделить тому, что часть данных, такая как реестр локальных актов, является внутренней и требует строгих мер безопасности для предотвращения утечек информации.

Статья направлена на исследование и разработку методов эффективной интеграции, анализа возможностей и ограничений существующих подходов, и демонстрации практической реализации системы на примере ПензГТУ. Через применение архитектуры *RAG*, в сочетании с отечественными языковыми моделями *GigaChat* и *YandexGPT*, а также зарубежной моделью *Claude*, цель исследования показать, как можно достичь высокой точности и релевантности ответов в специализированных областях знаний.

**Методология.** Одним из центральных элементов в интеграции языковых моделей с внешними источниками является архитектура *RAG*, применяющая двухэтапный процесс: на первом этапе происходит извлечение релевантных документов из внешней базы данных с использованием векторного поиска, а на втором – генерация ответа на основе как исходного запроса, так и извлечённых текстов [6]. Этот подход позволяет модели динамически адаптироваться к специфике заданного вопроса, значительно улучшая точность и релевантность ответов.

Пример использования метода *RAG* можно увидеть в «Базе знаний» СберТех, где он используется для поиска и ответов на вопросы по энциклопедическим данным, демонстрируя высокую точность благодаря эффективному сочетанию генеративных и извлекающих компонентов.

Процесс интеграции языковых моделей с базами знаний и внешними источниками данных можно разделить на несколько основных методов:

*Прямая интеграция через API или запросы к базам данных:* этот метод предполагает, что модель может напрямую отправлять запросы к базам данных или через *API* для извлечения необходимой информации [7]. Это требуется, чтобы модель могла формулировать запросы в формате, понятном для баз данных, и обрабатывать полученные ответы.

Можно использовать *Python* с библиотеками *requests* или *sqlalchemy* для создания запросов к *API* или базам данных:

```
import requests
import json

def fetch_data_from_api(query):
    response = requests.get(f"<https://api.example.com/data?query={query}>")
    return json.loads(response.text)

data = fetch_data_from_api("select * from knowledge_base where topic='AI'")
```

*Использование внедряемых (embedded) знаний:* данный метод встраивает необходимые знания непо-

средственно в параметры модели через процесс предварительного обучения (*pre-training*) [8] или файн-тюнинга (*fine-tuning*) [9]. Данным методом модель можно обучить на текстах из определённой области знаний, и векторные представления этих текстов сохраняются как часть самой модели. При запросе модель может опираться на эти внедрённые знания для улучшения качества ответа, но в зависимости от размерности модели данный метод может потребовать большого количества вычислительных ресурсов.

*Использование RAG:* данный метод использует двухэтапный процесс для интеграции информации из внешних источников. На первом этапе производится извлечение релевантных документов, а на втором – генерация ответа на основе этих документов [10].

На рисунке 1 показана визуализация *RAG* с помощью диаграммы, где показано, как запрос пользователя преобразуется в вектор, используемый для поиска в индексированной базе данных, и как результаты этого поиска используются для генерации ответа.

*Архитектура системы.* Архитектура системы интеграции языковых моделей с базами знаний и внешними источниками данных в ПензГТУ, изображенная на рисунке 2, разработана для обеспечения гибкости, масштабируемости и высокой степени безопасности. Основные компоненты системы включают:

*Интерфейс пользователя (User Interface):* веб-интерфейс, позволяющий пользователям задавать вопросы и получать ответы.

*Серверная часть (Backend Server):* сервис обработки запросов (*Request Processing Service*), анализирующий входящие запросы, и формирующий задачи для системы извлечения данных.

*Сервис извлечения данных (Data Retrieval Service):* сервис, взаимодействующий с внешними и внутренними базами данных для извлечения необходимой информации, использующий методы векторизации и поиска для определения наиболее релевантных данных для запроса пользователя.

*Модуль обработки и генерации ответов (Answer Processing and Generation Module):* модуль, применяющий *RAG* и данные из сервиса извлечения данных для генерации ответов с использованием языковых моделей типа *GigaChat*, *YandexGPT*, и *Claude*.

*База данных (Database):* база данных содержит структурированные данные *FAQ*, сведения об образовательной организации, информацию с сайта приемной комиссии и данные реестра локальных актов.

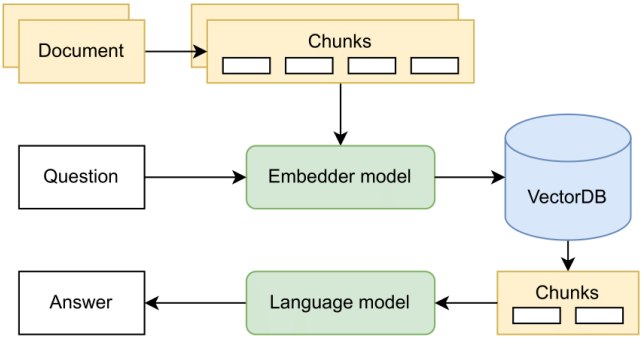



*Рисунок 1 – Архитектура Retrieval-Augmented Generation. Запрос пользователя трансформируется в вектор, используемый для поиска по базе данных, после чего извлечённые данные подаются на вход генеративной модели для создания ответа*

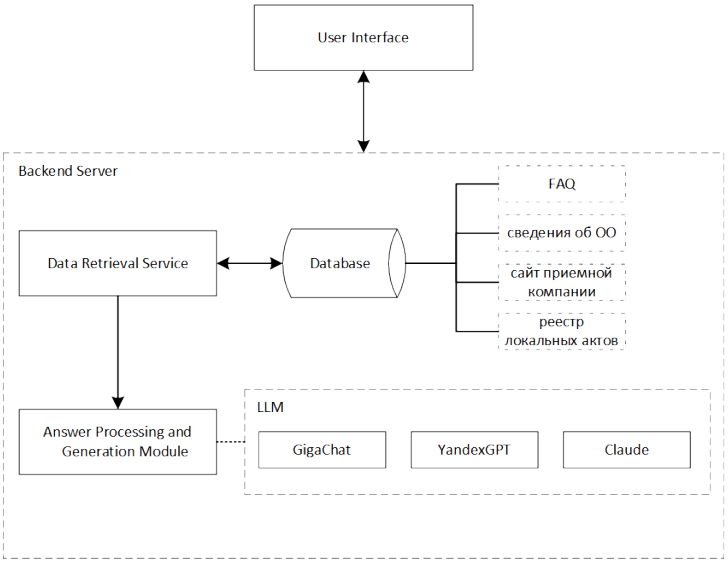



*Рисунок 2 – Архитектура системы интеграции языковых моделей с базами знаний и внешними источниками данных в ПензГТУ*

Система использует векторное представление запроса пользователя для поиска наиболее релевантных фрагментов данных в базе. Это делается путем вычисления косинусной близости между вектором запроса и векторами данных.

```
def search_relevant_data(query_vector, index_name, top_k=5):
        search_result = es.search(index=index_name, body={
        "query": {
          "script_score": {
            "query": {"match_all": {}},
            "script": {
                "source": "cosineSimilarity(params.query_vector, doc['question_vector']) + 1.0",
              "params": {"query_vector": query_vector}
            }
          }
        },
        "size": top_k
      })

    return [hit['_source'] for hit in search_result['hits']['hits']]
```

Используя модели *RAG* и *LLM*, система генерирует ответы на основе извлеченных данных. *RAG* генерирует начальные ответы, которые затем могут быть дополнительно уточнены или расширены с помощью *LLM*.

```
def generate_answer(query, relevant_data, model):
    context = ' '.join([data['text'] for data in relevant_data])
    input_text = query + " " + context
    return model.generate(input_text, max_length=200)

model = LLM()
answer = generate_answer(user_query, search_relevant_data(vectorize_text(user_query), 'faq_vectors'), model)
```

После генерации ответ проходит через модуль пост-обработки, который проверяет его на соответствие критериям качества (точности), и затем отправляется пользователю.

*Источник новых знаний для языковых моделей.* Основным источником новых знаний является база данных, сформированная из структурированных данных в векторном виде. Исходные данные представлены в форматах *JSON, HTML, PDF, DOC/DOCX*. Первоначальная обработка данных и формирование базы данных включают этапы сбора данных (*Data collection*), нарезки (*Splitter*), векторизации (*Vectorization*) и сохранения в базу данных.

На рисунке 3 показана архитектура процесса сбора данных, нарезки, векторизации и сохранения в базу данных. Этот процесс включает несколько основных этапов:

*Сбор данных (Data collection)* представляет собой агрегацию информации из различных источников ПензГТУ, включая часто задаваемые вопросы (*FAQ*), сведения об образовательной организации, реестр локальных актов и данные с сайта приемной комиссии. Данные из структурированных источников загружаются в формате *JSON*, *PDF*, *DOC/DOCX*. Информация с сайта приемной комиссии извлекается с использованием веб-скраперов.

*Нарезка данных (Splitter)* помогает улучшить процесс векторизации и дальнейшего поиска данных путем разделения объемных данных на отдельные фрагменты. Вопросы и ответы в *FAQ* обрабатываются отдельно с помощью метода рекурсивной нарезки JSON (*Recursive JSON splitter*). Данные из *PDF*, *DOC/DOCX* разделяются на блоки размером 300 символов с пересечением в 70 символов (*Recursive character text splitter*). *HTML*-документы нарезаются на основе структурных элементов заголовков (*HTML header text splitter*).

*Векторизация (Vectorization)* преобразует нарезанные фрагменты данные в векторные представления с помощью метода *GigaChat Embeddings*. Векторизация позволяет преобразовать текстовые данные в числовые векторы, которые затем могут быть эффективно обработаны языковыми моделями.

Векторные представления данных сохраняются в специализированную базу данных, готовую для быстрого поиска и извлечения релевантной информации по запросам пользователей.

Этот процесс обеспечивает языковым моделям доступ к актуальным и релевантным данным, что значительно улучшает их способность отвечать на специализированные запросы.

*Работа с LLM.* В рамках системы интеграции языковых моделей с базами знаний и внешними источниками данных используются такие большие языковые модели как *GigaChat, YandexGPT, Claude*, характеристики моделей представлены в таблице 1.

*GigaChat* является разработкой исследовательского подразделения компании Сбер, представляющая собой большую языковую модель, оптимизированную для русскоязычного сегмента [11-13]. Модель обучалась на большом корпусе текстов, включая литературные произведения, научные статьи, новостные материалы и Интернет-дискуссии на русском языке. Основное преимущество *GigaChat* заключается в высокой степени понимания русскоязычного контекста и способности генерировать информативные ответы на широкий спектр вопросов.

*YandexGPT* разработана компанией Яндекс, основанная на архитектуре *Generative Pre-trained Transformer* (*GPT*) [14-17]. Модель обучена на обширном наборе данных, включая тексты из интернета, литературу и специализированные базы знаний. Модель эффективно справляется с задачами на понимание текста и генерацию ответов, имеет хорошую адаптацию к русскоязычным данным, интегрирована в ряд

сервисов компании и может быть дополнительно дообучена под конкретные задачи, но предоставляемы инструменты для дообучения не позволяют обучить модель новым знаниям.

*Claude* зарубежная модель от *Anthropic*, основанная на архитектуре *Transformer* и предназначенная для обработки естественного языка с высокой степенью обобщения [18-20].

Модель обучалась на разнообразных данных, включая тексты на нескольких языках, что позволяет ей эффективно работать в мультиязычном контексте. *Claude* отличается высокой точностью в ответах на вопросы, умением обрабатывать сложные запросы и способностью к мультиязычной обработке, что делает её идеальной для тестирования и сравнительного анализа с отечественными моделями.

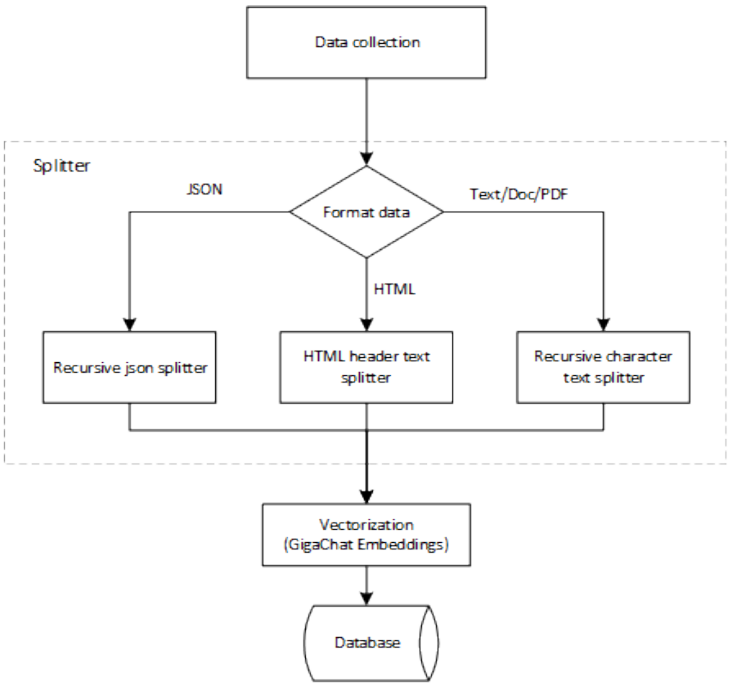



*Рисунок 3 – Архитектура процесса сбора данных, нарезки, векторизации и сохранения в базу данных*

*Таблица 1 – Характеристики языковых моделей*

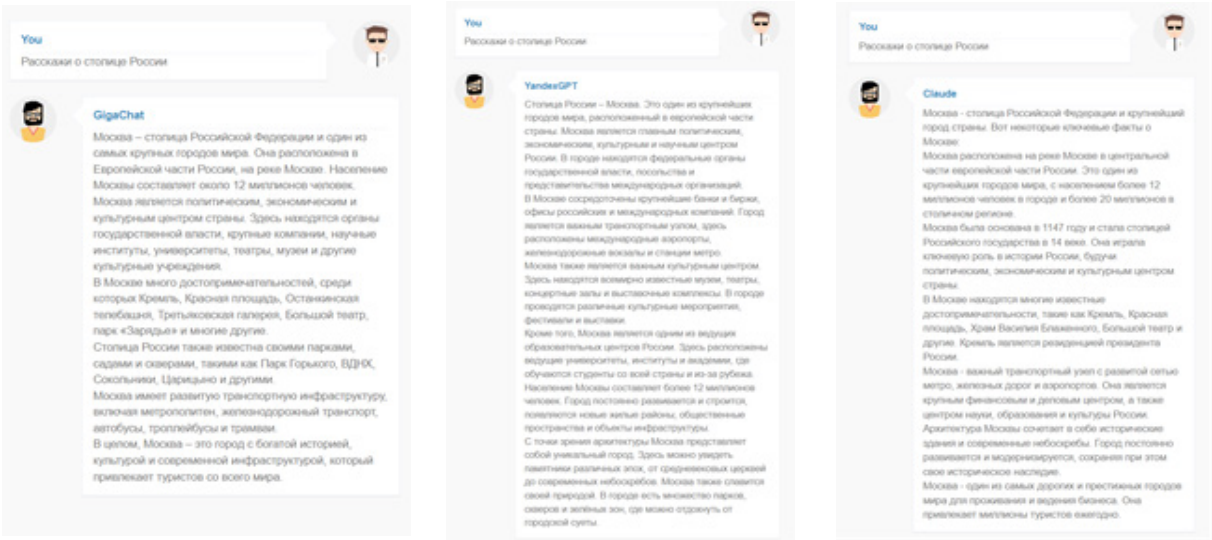
| Название LLM | Размер модели (количество параметров) | Размер контекстного окна (токенов) | Возможность дообучения (fine-tune) | Доступность в РФ |
|---|---|---|---|---|
| GigaChat (Lite) | 7 млрд | 8192 | Нет | Да |
| GigaChat (Lite+) | 7 млрд | 32768 | Нет | Да |
| GigaChat (Pro) | 29 млрд | 8192 | Нет | Да |
| YandexGPT (Lite) | – | – | Да | Да |
| YandexGPT (Pro) | – | – | Да | Да |
| Claude 3 (Haiku) | ~20 млрд | 200000 | Нет | Нет |
| Claude 3 (Sonnet) | ~70 млрд | 200000 | Нет | Нет |
| Claude 3 (Opus) | ~2 трлн | 200000 | Нет | Нет |

Для реализации системы и проведения экспериментальной части были выбраны модели *GigaChat (Pro)*, *YandexGPT (Pro)* и *Claude 3 (Sonnet)* в виду их доступности и высокой скорости работы.

Интеграция *RAG* с *LLM* представляет собой двухэтапный процесс, где *RAG* отвечает за извлечение релевантных данных из базы, а *LLM* – за генерацию ответов на основе этих данных. Когда пользователь отправляет запрос, система сначала использует модуль *RAG* для поиска и извлечения релевантных фрагментов данных из базы. Это делается путём преобразования запроса в вектор и поиска наиболее близких к нему векторов данных. После извлечения данных *RAG* передаёт их в модель *LLM* вместе с исходным запросом. *LLM* затем генерирует ответ, опираясь на полученные данные и контекст запроса.

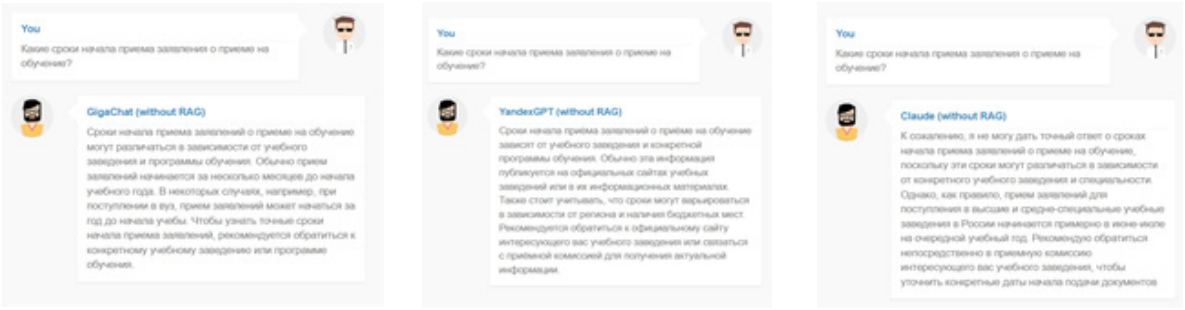
**Результаты.** Для оценки эффективности интегрированной системы были проведены эксперименты с общими и специализированными вопросами. Примеры вопросов и полученные ответы от различных моделей показаны на рисунках 4-6.

*Оценка точности ответов.* Точность ответов языковых моделей была оценена с использованием экспертной оценки и сравнительного анализа с эталонными ответами. Эксперты оценивали релевантность и полноту предоставленной информации по шкале от 1 до 5. Результаты экспериментов представлены в таблице 2.



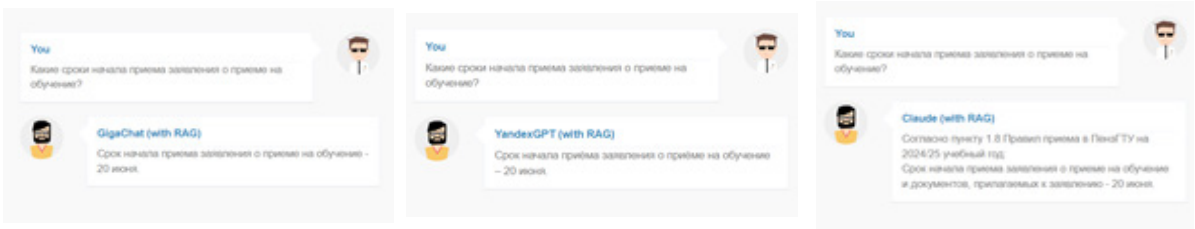

*а)* *б)* *в)*

*Рисунок 4 – Общие вопросы к LLM. Вопрос: «Расскажи о столице России». а) GigaChat, б) YandexGPT в) Claude*




*а)* *б)* *в)*

*Рисунок 5 – Специализированные вопросы университета к LLM (без использования RAG). Вопрос: «Какие сроки начала приема заявления о приеме на обучение?». а) GigaChat, б) YandexGPT в) Claude*




*а)* *б)* *в)*

*Рисунок 6 – Специализированные вопросы университета к LLM (с использованием RAG)). Вопрос: «Какие сроки начала приема заявления о приеме на обучение?». а) GigaChat, б) YandexGPT в) Claude*

*Таблица 2 – Оценка точности ответов LLM*

| Название LLM | Общие вопросы | Специализированные вопросы без RAG | Специализированные вопросы с RAG |
|---|---|---|---|
| GigaChat | 4.7 | 1.2 | 4.2 |
| YandexGPT | 4.5 | 1.3 | 4.1 |
| Claude | 4.6 | 2.0 | 4.4 |

**Обсуждение.** Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что все три модели демонстрируют высокую точность ответов на общие вопросы. Однако, на специализированных вопросах модели показывают крайне низкие результаты, что объясняется отсутствием знаний, полученных в процессе обучения. Применение *Retrieval-Augmented Generation (RAG)* позволило существенно повысить качество ответов рассматриваемых моделей. В частности, модель *GigaChat* показала немного лучшие результаты на специализированных вопросах, что, вероятно, связано с её лучшей адаптацией к локальному контексту и специфике данных ПензГТУ.

Сравнительный анализ показывает, что отечественные модели *GigaChat* и *YandexGPT* обеспечивают сопоставимую точность с зарубежной моделью

*Claude*. Это подчеркивает их потенциал для использования в русскоязычных информационных системах и возможность замены зарубежных аналогов в локальных задачах.

**Выводы.** Разработанная система интеграции языковых моделей с базами знаний и внешними источниками данных демонстрирует высокую эффективность в обработке и генерации ответов на вопросы пользователей. Эксперименты показали, что модели *GigaChat*, *YandexGPT* и *Claude* могут эффективно использоваться для обработки как общих, так и специализированных вопросов, с небольшим преимуществом отечественных моделей в контексте специализированных запросов.

Использование *RAG* для извлечения данных и *LLM* для генерации ответов позволяет создать масштабируемую и гибкую систему, способную адаптироваться под различные типы запросов и источники данных. Отечественные модели, такие как *GigaChat* и *YandexGPT*, продемонстрировали свою конкурентоспособность по сравнению с зарубежными аналогами, что делает их предпочтительным выбором для проектирования автоматизированных систем обработки запросов в русскоязычном сегменте.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Chang Y. et al. A survey on evaluation of large language models //ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology. – 2024. – Т. 15. – №. 3. – С. 1-45.

2. Feng S. et al. Don't Hallucinate, Abstain: Identifying LLM Knowledge Gaps via Multi-LLM Collaboration //arXiv preprint arXiv:2402.00367. – 2024.

3. Yang S. et al. Llm-based sparql generation with selected schema from large scale knowledge base //China Conference on Knowledge Graph and Semantic Computing. – Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. – С. 304-316.

4. Jeong C. Generative AI service implementation using LLM application architecture: based on RAG model and LangChain framework //Journal of Intelligence and Information Systems. – 2023. – Т. 29. – №. 4. – С. 129-164.

5. Wu K., Wu E., Zou J. How faithful are RAG models? Quantifying the tug-of-war between RAG and LLMs' internal prior // arXiv preprint arXiv:2404.10198. – 2024.

6. Fatehkia M., Lucas J.K., Chawla S.T-RAG: Lessons from the LLM Trenches //arXiv preprint arXiv:2402.07483. – 2024.

7. Huang Q. et al. Let's Chat to Find the APIs: Connecting Human, LLM and Knowledge Graph through AI Chain //2023 38th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering (ASE). – IEEE, 2023. – С. 471-483.

8. Khalifa M. et al. Source-Aware Training Enables Knowledge Attribution in Language Models //arXiv preprint arXiv:2404.01019. – 2024.

9. Lin X. et al. Data-efficient Fine-tuning for LLM-based Recommendation //arXiv preprint arXiv:2401.17197. – 2024.

10. Alan A.Y., Karaarslan E., Aydin O. A RAG-based Question Answering System Proposal for Understanding Islam: MufassirQAS LLM //arXiv preprint arXiv:2401.15378. – 2024.

11. Kosenko D.P., Kuratov Y.M., Zharikova D.R. Accessible Russian Large Language Models: Open-Source Models and Instructive Datasets for Commercial Applications //Doklady Mathematics. – Moscow: Pleiades Publishing, 2024. – С. 1-6.

12. Patarakin, Ye.D. Experimental generation of educational tasks in natural science disciplines using artificial intelligence / Ye.D. Patarakin, V.V. Burov, D.V. Soshnikov // MCU Journal of Pedagogy and Psychology. – 2023. – Vol. 17, No. 4. – P. 28-41. – DOI 10.25688/2076-9121.2023.17.4.02. – EDN: GKGMTZ.

13. Pugachev, A.A. Transforming the future: a review of artificial intelligence models / A.A. Pugachev, A.V. Kharchenko, N.A. Sleptsov // RUDN Journal of Studies in Literature and Journalism. – 2023. – Vol. 28, No. 2. – P. 355-367. – DOI 10.22363/2312-9220-2023-28-2-355-367. – EDN: RZMQIG.

14. Fedotova A. et al. Semantic Clustering and Transfer Learning in Social Media Texts Authorship Attribution //IEEE Access. – 2024.

15. Солдатенкова Ю.А. YandexGPT и ChatGPT: характеристика, сравнение и основные отличия нейросетей / Ю.А. Солдатенкова, А.В. Свищев // Моя профессиональная карьера. – 2023. – Т. 3, № 55. – С. 277-284. – EDN: NNYBOI.

16. Баженов В.И. Искусственный интеллект в сфере ВКХ. Интервью с нейросетью YandexGPT 2 / В.И. Баженов // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. – 2024. – № S2. – С. 1-19. – EDN: DEJLZO.

17. Колесникова Т.П. Современная стратегия развития искусственного интеллекта / Т.П. Колесникова, И.Н. Седова, А.В. Баукин // Трансформация науки и образования в современном обществе: теория и практика междисциплинарных исследований: Материалы I Всероссийской научно-практической конференции, Москва, 15 января 2024 года. – Москва: Научное издательство полного цикла "Научная парадигма", 2024. – С. 175-177. – EDN: SVKXNF.

18. Adetayo A.J., Aborisade M.O., Sanni B.A. Microsoft Copilot and Anthropic Claude AI in education and library service // Library Hi Tech News. – 2024.

19. Горшков Д.А. Анализ рынка систем искусственного интеллекта в мире и России / Д.А. Горшков, А.А. Щеголев, В.П. Рябов // Актуальные проблемы прикладной информатики: материалы национальной научно-практической конференции, Воронеж, 13-22 марта 2023 года. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2023. – С. 23-28. – EDN: KGMDSE.

20. Алексеев, Д.В. Использование генеративного ИИ при анализе данных веб-аналитики / Д.В. Алексеев // Universum: технические науки. – 2024. – № 2-1(119). – С. 4-9. – DOI 10.32743/UniTech.2024.119.2.16815. – EDN: SQSRHI.

*Статья поступила в редакцию 17.05.2024*
*Статья принята к публикации 17.06.2024*

УДК: 004.652.6
EDN: CMZGRK

**РАЗРАБОТКА ГРАФИЧЕСКОЙ НОТАЦИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ *NOSQL* БАЗ ДАННЫХ**

© Автор(ы) 2024

SPIN: 2851-1051
AuthorID: 722550
ORCID: 0000-0001-9468-4404
ResearcherID: ADL-1915-2022

**РОМАКИНА Оксана Михайловна**, кандидат физико-математических наук,
доцент факультета «Инфокоммуникационных технологий»
*Национальный исследовательский университет ИТМО*
*(197101, Россия, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А., e-mail: omromakina@itmo.ru)*

SPIN: 2977-6034
AuthorID: 729089
ORCID: 0000-0002-2606-1667
ResearcherID: B-6473-2014
ScopusID: 56217994100

**АРСЕНЬЕВА Анна Закировна**, старший преподаватель факультета инфокоммуникационных технологий
*Национальный исследовательский университет ИТМО*
*(197101, Россия, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А., e-mail: anna.z.arseneva@itmo.ru)*

SPIN: 2517-8690
AuthorID: 1244974
ORCID: 0009-0008-1259-8886

**КЛЕМЕШЕВА Анастасия Сергеевна**, магистрант
*Национальный исследовательский университет ИТМО*
*(197101, Россия, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А., e-mail: primell@itmo.ru)*

SPIN: 4751-6200
AuthorID: 724154
ORCID: 0000-0002-7944-0468
ResearcherID: N-8229-2016
ScopusID: 57193408429

**ЗАЙЦЕВА Екатерина Викторовна**, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Информатики и компьютерных технологий»
*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II*
*(199106, Россия, Санкт-Петербург, линия 21-я В.О., дом 2, e-mail: Zaytseva_EV@pers.spmi.ru)*

**Аннотация.** Статья посвящена проблеме логического моделирования нереляционных баз данных. В отличие от реляционных баз данных, *NoSQL* базы данных отличаются большей гибкостью структуры данных. Во многом из-за высокой скорости развития технологий единый стандарт моделирования не был разработан. В статье предложено использование в проектировании основных видов нереляционных баз данных единой нотации, схожей с графическими нотациями, использующимися для моделирования реляционных баз данных. В качестве основы взята известная нотация Мартина, «воронья лапка», которая была дополнена новыми элементами для отражения специфики четырех наиболее распространенных типов *NoSQL* баз данных: колоночной, документной, графовой и «ключ-значение». В статье рассматриваются особенности применения разработанной нотации для каждого из основных типов *NoSQL* баз данных, приводятся практические примеры, иллюстрирующие использование нотации. Результатом разработки стала графическая нотация, с помощью которой можно проводить логическое моделирование рассмотренных видов нереляционных, а также реляционных баз данных. Разработанная нотация позволяет наглядно представить структуру данных, связи между элементами и ключевые особенности каждой модели. Предложенный подход упрощает процесс проектирования *NoSQL* баз данных, делая его более понятным и доступным для специалистов, знакомых с реляционными моделями, и облегчает последующую поддержку баз данных.

**Ключевые слова:** базы данных, логическое моделирование, *NoSQL*, графическая нотация, «воронья лапка», документная модель, колоночная модель, модель «ключ-значение», графовая модель, реляционная модель.

**DEVELOPMENT OF GRAPHICAL NOTATION FOR MODELING *NOSQL* DATABASES**

© The Author(s) 2024

**ROMAKINA Oksana Mikhaylovna**, candidate of physical and mathematical sciences,
associate professor of the faculty of «Information and Communication Technologies»
*ITMO University*
*(197101, Russia, St. Petersburg, Kronverksky ave., 49, lit. A., e-mail: omromakina@itmo.ru)*

**ARSENEVA Anna Zakirovna**, senior tutor at the faculty of «Information and Communication Technologies»
*ITMO University*
*(197101, Russia, St. Petersburg, Kronverksky ave., 49, lit. A., e-mail: anna.z.arseneva@itmo.ru)*
**KLEMESHEVA Anastasiia Sergeevna**, master student
*ITMO University*
*(197101, Russia, St. Petersburg, Kronverksky ave., 49, lit. A., e-mail: primell@itmo.ru)*
**ZAYTSEVA Ekaterina Viktorovna**, candidate of technical sciences,
associate professor of the Department of «Computer Science and Computer Technology»
*Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University*
*(199106, building 2, line 21st V.O., St. Petersburg, Russia, e-mail: Zaytseva_EV@pers.spmi.ru)*

**Abstract.** The article is devoted to the problem of non-relational databases logical modeling. Unlike relational databases, *NoSQL* databases have a more flexible data structure. Largely due to the high speed of technology development, a unified modeling standard has not been developed yet. The article proposes the use of a single notation for the design of the main types of non-relational databases, similar to graphical notations used for modeling relational databases. The well-known Martin's notation, "crow's foot", was taken as the basis, which was supplemented with new elements to reflect the specifics of four most widely used types of *NoSQL* databases: column, document, graph and key-value. The article considers the application features of the developed notation for each of the main types of *NoSQL* databases, provides practical examples illustrating notation usage. As the result, a graphical notation was developed, with the help of which it is possible to conduct logical modeling of the considered types of non-relational, as well as relational databases. The developed notation allows to visualize the data structure, the relationships between the elements and the key features of each model. The approach, proposed in this article, simplifies the *NoSQL* database design process, making it more understandable and accessible to specialists familiar with relational models, and facilitates subsequent database support.

**Keywords:** databases, logical modeling, *NoSQL*, graphical notation, "crow's foot", document data model, column data model, key-value data model, graph data model, relational data model.

***Для цитирования:*** *Ромакина О.М. Разработка графической нотации моделирования NoSQL баз данных / О.М. Ромакина, А.З. Арсеньева, А.С. Клемешева, Е.В. Зайцева // XXI век:итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 2(66). – С. 32-42. – EDN: CMZGRK.*

**Введение.** Любая информационная система требует хранения и обработки данных. В течение десятилетий для этих целей применялись реляционные базы данных, обеспечивающие высокую надежность работы с данными. Однако с течением времени объемы данных, требующих обработки, непрерывно возрастали, и их структура уже не всегда укладывалась в строгую табличную логику. Поскольку реляционная модель не удовлетворяет требованиям гибкости структуры БД и возможности проведения горизонтального масштабирования, в качестве альтернативы стали активно применяться нереляционные (или *NoSQL*) базы данных [1]. Их развитие и распространение было стремительным, и, в отличие от реляционных баз данных, методам проектирования нереляционных БД было уделено незаслуженно мало внимания, в частности это касается создания графических нотаций моделирования *NoSQL* баз данных [2].

Графическая нотация – это определенный стандарт, который используется для визуализации структуры базы данных в виде схем на этапе концептуального, логического и физического моделирования. Такие схемы необходимы как на этапе проектирования, так и для последующей поддержки и развития базы данных. Наглядное представление структуры упрощает работу с базой данных и при моделировании помогает выявлять ошибки на ранних этапах [3].

*NoSQL* базы данных считаются бессхемными, и тем не менее данные в таких базах организованы согласно некоторой подразумеваемой схеме. Она менее жесткая, чем в реляционной модели, благодаря чему и обеспечивается гибкость и адаптивность базы данных к новым требованиям. Помимо этого, важно учитывать, что специалисты привыкли мыслить категориями реляционной модели данных и опираться на свой опыт работы с ней при проектировании *NoSQL* баз данных [4]. Именно по этой причине при моделировании нереляционных баз данных некоторые разработчики применяют графические нотации, предназначенные для моделирования реляционных баз данных [5]. Однако поскольку эти нотации не предусматривают специфические особенности *NoSQL* баз данных, они не подходят для их полноценного моделирования. Тем не менее, представляется целесообразным взять их за основу разрабатываемой нотации.

Многие исследователи прибегали к упомянутой возможности при разработке графических нотаций моделирования различных типов нереляционных баз данных [6-10], однако работы по этой тематике касаются одной или двух моделей данных.

В данной статье предлагается унифицированная графическая нотация для моделирования документных, графовых, колоночных баз данных и баз данных «ключ-значение». Унификация нотации позволит не только получить универсальный инструмент моделирования, но и предоставит возможность моделировать мультимодельные базы данных

[11]. Поскольку за основу взяты элементы нотаций, разработанных для реляционных баз данных, предлагаемая нотация также может быть использована и для их моделирования.

**Методология.** В структуре данных нереляционных баз данных существуют зависимости и взаимосвязи, характерные и для реляционной модели, поэтому разработанная графическая нотация для *NoSQL* будет включать паттерны нотаций, разработанных для моделирования реляционных баз данных.

К основным, наиболее распространенным нереляционным моделям можно отнести колоночные, документные, «ключ-значение» и графовые модели. В упрощенном виде каждую из них можно представить как структуру «ключ-значение», где ключ может быть составным, а значение – вектором характеристик. Эту характерную особенность целесообразно использовать далее при моделировании баз данных перечисленных выше моделей.

– Модель «ключ-значение». Ключи связаны со значениями определенного типа.

– Графовая модель. И узлы, и ребра можно представить структурой «ключ-значение». Для ребер ключами выступают ключи узлов, между которыми проводится связь, и названия ребер, значениями являются некоторые веса. Узлы идентифицируются уникальными ключами, которым соответствуют наборы характеристик.

– Документная модель. Каждый документ обладает уникальным идентификатором и набором значений. Коллекции документов также соответствуют этой структуре, ключом выступает имя коллекции, значением – перечень входящих в нее документов.

– Колоночная модель. Подобно реляционной модели, каждому ключу соответствует ряд значений атрибутов [12].

При логическом моделировании [13] баз данных выделяют три уровня детализации, которым соответствуют следующие диаграммы:

– презентационные;

– ключевые;

– полные атрибутивные.

На презентационной диаграмме выделяются основные сущности предметной области, связи между ними изображаются, но не детализируются. На ключевой диаграмме добавляются ключевые атрибуты, связи детализируются. Наиболее подробно сущности, их атрибуты с типами данных и связи между сущностями описываются на полной атрибутивной диаграмме. Необходимо отметить, что тип данных у атрибутов указывается без привязки к конкретной СУБД [14].

Под базовыми типами атрибутов будем понимать числовой, текстовый, дата/время, денежный, логический, *BLOB* (бинарный) типы. Данный перечень не является исчерпывающим, однако каждый атрибут – это некоторое атомарное значение, относящееся к одному из типов данных.

Главная задача, которую требуется решить при разработке графической нотации моделирования нереляционных моделей данных – формирование способа отображения диаграмм таким образом, чтобы сохранялась гибкость структуры данных. Это представляет некоторую сложность, поскольку в нереляционных базах данных хранятся неструктурированные или полуструктурированные данные, и экземпляры одной сущности могут обладать произвольными атрибутами, из-за чего невозможно выделить единый полный перечень атрибутов, которому будет соответствовать каждый экземпляр.

Для отображения этой особенности предлагается ввести на уровне логического проектирования новый тип данных – комплексный (*complex type*), который представляет собой вектор из неопределенного числа составляющих. Таким образом, помимо атрибутов, которые точно должны содержаться в описании сущности, можно обозначать, что некоторые данные могут, но не обязаны присутствовать.

Помимо типов, у атрибутов есть также разные виды: атрибут может быть первичным или внешним ключом (в случае проектирования реляционной БД), являться обязательным или не обязательным атрибутом, уникальным или не уникальным. Виды атрибутов удобно указывать в явном виде, для этого предлагаются символы, представленные в таблице 1.

*Таблица 1 – Предлагаемые обозначения*

| Обозначение | Вид атрибута |
|---|---|
| # | Ключ |
| ! | Уникальный атрибут |
| f | Внешний ключ |
| + | Обязательный атрибут |
| - | Не обязательный атрибут |
| | Атрибут с неустановленным видом |

Если атрибут относится сразу к двум видам, соответствующие символы указываются последовательно. Обозначение атрибута с неустановленным видом предусмотрено для тех случаев, когда нет необходимости указывать вид, каким бы он ни был, таким образом, обозначение видов атрибутов не является обязательным в рамках предложенной нотации.

Все представленные выше обозначения можно с легкостью использовать на письме от руки или

набирать с клавиатуры в любом текстовом редакторе. В разработке этих символов учитывался опыт авторов нотации для моделирования графовых баз данных [10], где используются специальные символы, которые неудобно применять без специализированного редактора.

Далее были проанализированы существующие графические нотации моделирования реляционных баз данных, в частности нотация Питера Чена [15], *IDEF1x* [16], *UML* [17] и нотации Мартина [18] и Баркера [19]. В каждой из них данные, подлежащие хранению, представляются как набор связанных между собой сущностей, обладающих именами, ключами, обеспечивающими связи, и фиксированным набором атрибутов.

В рассмотренных нотациях моделирования реляционных баз данных используются различные обозначения (рис. 1, аналогично работе [20]), которые уже привычны для разработчиков. При разработке нотации было принято решение опираться на эти паттерны, поскольку это повысит удобство использования нотации и избавит пользующихся ею специалистов от необходимости запоминать новые обозначения. Тем не менее, были сделаны некоторые дополнения, необходимые для отражения на схемах специфических элементов, которых нет в реляционных базах данных.

В рамках предлагаемой нотации сущность предлагается изображать прямоугольником с тремя секциями: в первой указывается название, во второй – ключевые атрибуты, а в третьей – неключевые атрибуты (рис. 2).

| Элемент \ Нотация | Чена | Мартина | Баркера | IDEF1x | UML |
|---|---|---|---|---|---|
| Кардинальность 0, 1 | 1 | | | Z | 0..1 |
| Кардинальность строго N | 1 1 | | | | 1 |
| Кардинальность 0, 1...N | M | | | | 0..* |
| Кардинальность 1...N | 1 M | | | P | 1..* |
| Связь (не идентифицирующая) | имя | | | | нет |
| Связь (идентифицирующая) | имя | | | | нет |
| Сущность независимая | имя | имя<br>атрибуты | имя<br>атрибуты | имя<br>ключ<br>атрибуты | имя<br>атрибуты |
| Сущность зависимая | имя | нет | нет | имя<br>ключ<br>атрибуты | нет |
| Атрибут | атрибут | Список внутри прямоугольника | | | |
| Первичный ключ | П. ключ | Подчеркивается | #Отмечается символом решётка | Записывается первым, отделяется сплошной линией | |

*Рисунок 1 – Обозначения нотаций моделирования реляционных баз данных*

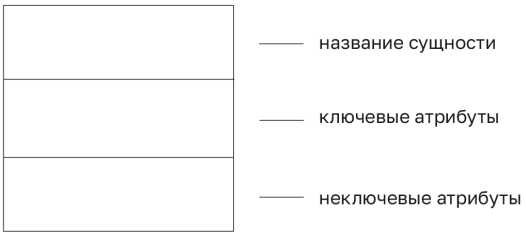



*Рисунок 2 – Обозначение сущности*

Тогда в общем виде диаграммы логической модели будут выглядеть, как показано на рисунке 3. На презентационной диаграмме отображаются только названия сущностей, на ключевой диаграмме добавляются ключевые атрибуты с указанием их типов, а на полной атрибутивной перечисляются все неключевые атрибуты, также с их типами.

Имя сущности находится внутри представляющего ее прямоугольника, чтобы не возникало путаницы, неизбежной при большом количестве сущностей, представленных на диаграмме.

Аналогичное замечание касается обозначения

связей. Нотация «воронья лапка» Мартина предлагает наглядные символы для обозначения кардинальности связей, эти символы находятся прямо на линии связей, а значит, воспринимаются с ними как единое целое, в отличие от расположенных сверху подписей, как в нотациях Питера Чена и *UML. IDEF1x* использует слишком схожие между собой символы-кружочки вместе с подписями *Z, n* и *P* для различия. Это недостаточно наглядное представление. Во всех нотациях, кроме «вороньей лапки», при большом числе сущностей и связей между ними непросто проследить, к какой именно связи относится надпись.

На рисунке 4 представлены символы, которые предлагается использовать для обозначения различных связей и зависимостей. Символы кардинальности «0...1», «только 1», «*0…M*» и «*1...M*» заимствованы из нотации Мартина. В дополнение к ним добавлено не предусмотренное этой нотацией обозначение кардинальности «строго *N*», где *N* – конкретное фиксированное число, указанное рядом со связью. Это легко понимаемый символ, схематичная буква *N* на линии, обозначающий связь.

Для моделирования документных БД в нотацию был добавлен символ, обозначающий вложенные документы. Подобный символ используется в нотации, предложенной в [8], однако в работе [8] символ используется для обозначения принадлежности документа коллекции.

Помимо перечисленных видов связей в нотацию целесообразно добавить аналог представлений из реляционных баз данных и обозначать их связь с источником данных пунктирной линией, а сами представления – пунктирными прямоугольниками из двух или трех секций, в зависимости от того, есть ли необходимость отображать на схеме ключ.

Рассматривалась возможность обозначения встроенных документов дополнительными прямоугольниками-подблоками, вложенными в основной прямоугольник документа на месте атрибута, который и является встроенным документом, однако при большом числе встроенных документов подобное отображение было бы чрезмерно громоздким, это затрудняло бы и формирование модели, и ее чтение.

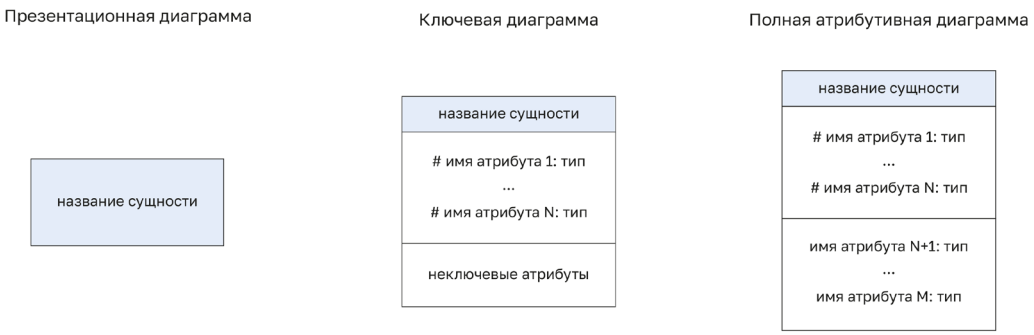



*Рисунок 3 – Логическая модель в общем виде*

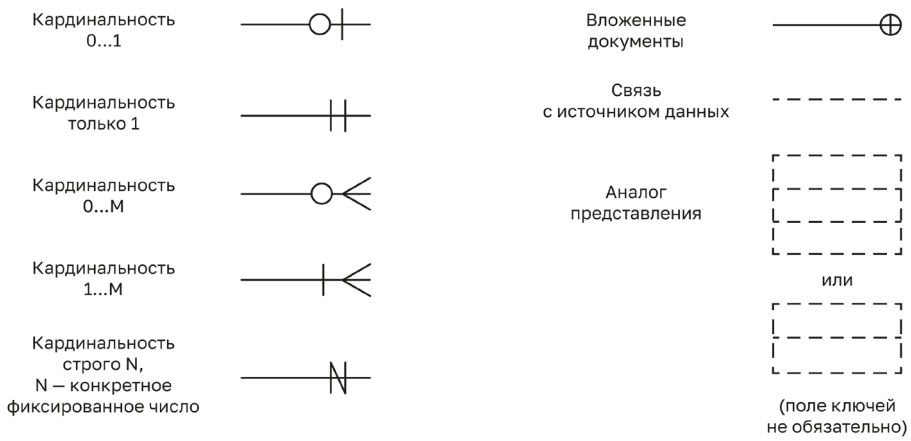



*Рисунок 4 – Обозначения связей и зависимостей*

**Результаты.** Предложенная нотация может быть применена для моделирования документных, «ключ-значение», колоночных, графовых, реляционных баз данных. Рассмотрим примеры диаграмм в перечисленных моделях данных, построенные с использованием предлагаемой нотации. В качестве предметной области была выбрана деятельность маркетплейсов, поскольку информационная система маркетплейса предполагает хранение и обработку огромного объема данных в разных моделях, а значит, выбранная предметная область позволит наглядно продемонстрировать применение нотации на практических примерах.

*Документная модель.* На рисунке 5 представлена

абстрактная диаграмма документной модели данных. Вообще, в документных базах данных существует два вида связей: связывание и встраивание. Связанные документы ссылаются друг на друга, множество документов может ссылаться на множество документов или не ссылаться ни на один. Встраивание предполагает вложенность документов в другие документы. При этом каждый документ относится к определенной коллекции.

В качестве примера для документной модели данных рассмотрим отношения между сущностями «Товар», «Отзыв» и «Тип» (рис. 6). Поскольку информация из отзывов на товар представляет ценность только по отношению к конкретному товару, именно документ «Товар» содержит ссылку на документ «Отзыв», в то время как «Отзыв» не имеет ссылки на «Товар». Существенным также является маркер «!-» атрибута «код_отзыва». В соответствии с таблицей 1 это уникальный необязательный атрибут, т.е. в случае отсутствия отзывов на товар данный атрибут будет отсутствовать, а по мере появления отзывов в документ «Товар» будут добавляться атрибуты «код_отзыва», каждый из которых будет принимать уникальное значение, что возможно благодаря гибкости структуры документной модели.

Заметим, что в силу особенностей реализации механизмов поиска и соединения во всех документных СУБД рекомендованным является подход, когда необходимая для одного или нескольких запросов информация содержится в рамках одной коллекции, так как операция соединения является такой же времязатратной операцией, как и в реляционных СУБД. Таким образом, в приведенном примере при запросе по коллекции «Товар» за минимальное время можно получить все характеристики товара и общее количество отзывов, а в случае необходимости просмотра отзывов, соответствующих товару, будет выполнено соединение с коллекцией «Отзывы» и отбор соответствующих документов. При подобном подходе к проектированию среднее время выполнения запросов к документной СУБД лишь немного превышает минимальное возможное время выполнения при имеющемся объеме данных. Также отметим, что встраивание документов, в отличие от связывания, в общем случае приводит к дополнительному расходу дискового пространства за счет возможного избыточного хранения данных, но обеспечивает минимальное время доступа к данным.

На рисунке 7 экземпляры этих сущностей представлены в виде *JSON*-документов. Цветом выделено название атрибута комплексного типа и следующий за ним в квадратных скобках перечень значений, который для разных товаров будет разным в зависимости от типа товара.

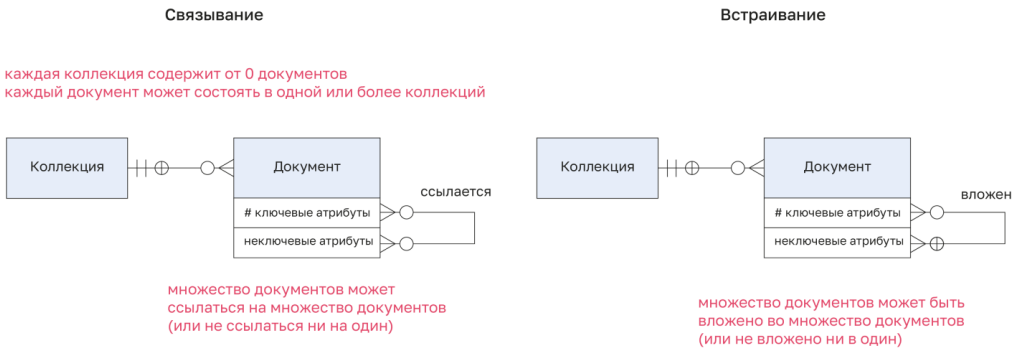



*Рисунок 5 – Абстрактная диаграмма документной модели данных*

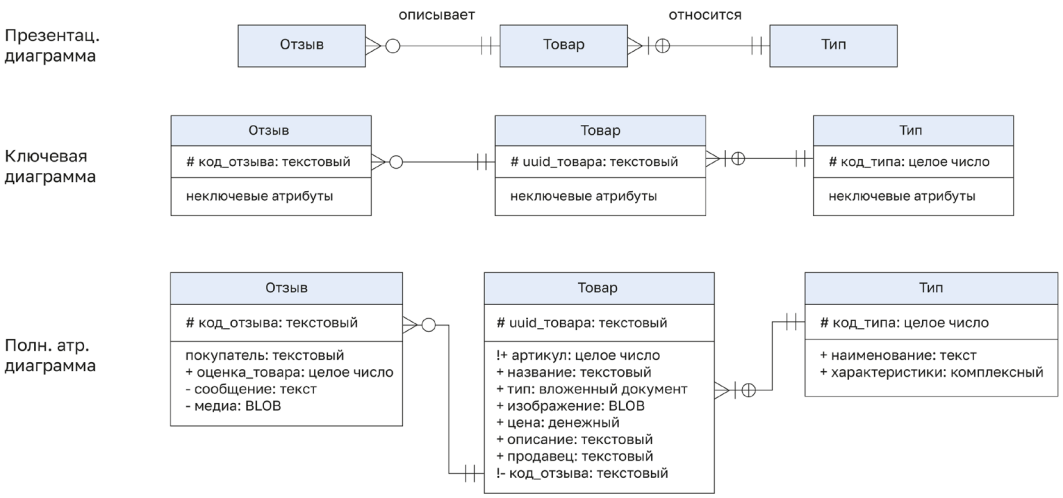



*Рисунок 6 – Логическая диаграмма документной модели данных*

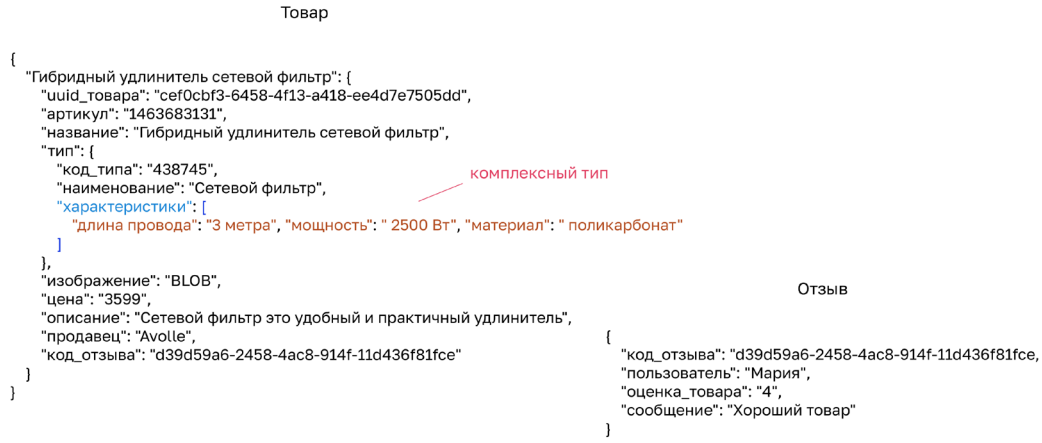



*Рисунок 7 – Экземпляры сущностей в виде JSON-документов*

*Модель «ключ-значение».* В модели «ключ-значение» данные хранятся парами, состоящими из ключа и значения, относящегося к комплексному типу. В общем виде эту модель можно представить абстрактной диаграммой, приведенной на рисунке 8.

Некоторые СУБД «ключ-значение» поддерживают ключи сортировки. В этом случае ключ будет представлен парой из ключа разбиения и ключа сортировки. В качестве примера рассмотрим сущность «Корзина». Тогда благодаря наличию ключа сортировки, например, по покупателю, можно отслеживать поведение покупателей, добавляющих товары в корзину. Пример логической диаграммы модели данных «ключ-значение» представлен на рисунке 9.

*Колоночная модель.* Колоночная модель предполагает хранение данных в обычных или широких колонках. Во втором случае колонки разделяются по семействам, и в данной нотации предлагается указывать семейство перед названием атрибута, разделяя их точкой. Абстрактная диаграмма колоночной модели приведена на рисунке 10.

Как и в модели «ключ-значение», ряд колоночных баз данных поддерживает ключи сортировки. На рисунке 11 сущность «Корзина» представлена в рамках колоночной модели. Помимо прочего, здесь демонстрируется отображение источника данных, на основе которого на этапе физической реализации модели можно сформировать аналоги представлений. Например, содержимое корзины для каждого покупателя или сведения о корзинах, содержащих конкретный товар.

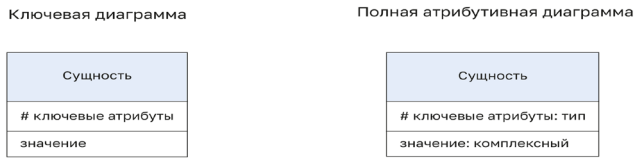



*Рисунок 8 – Абстрактная диаграмма модели данных «ключ-значение»*

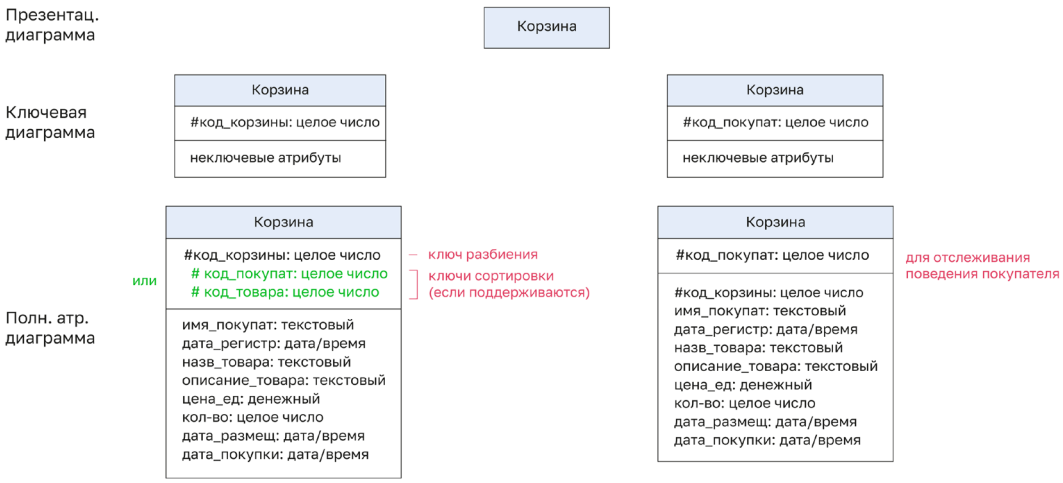



*Рисунок 9 – Логическая диаграмма модели данных «ключ-значение»*

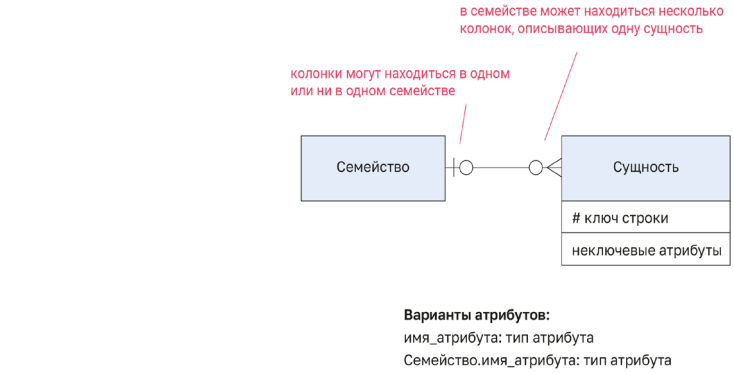



*Рисунок 10 – Абстрактная диаграмма колоночной модели данных*

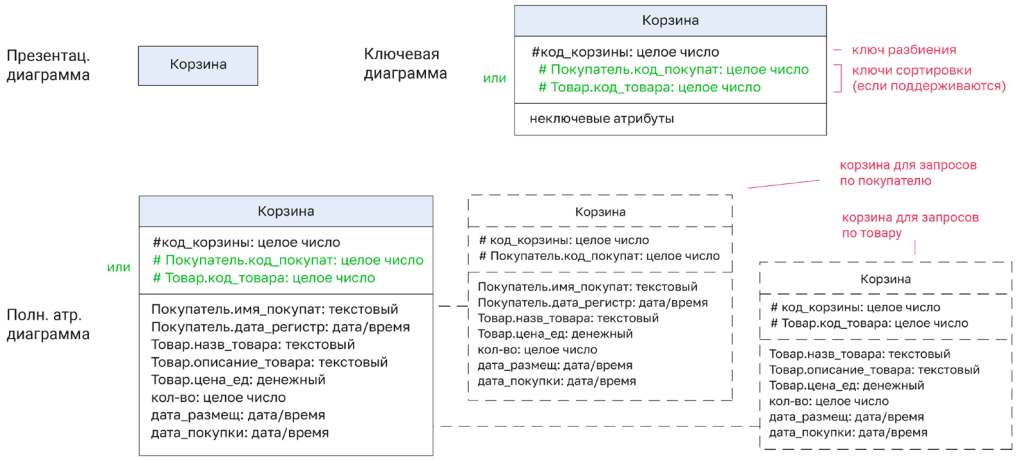



*Рисунок 11 – Логическая диаграмма колоночной модели данных*

*Графовая модель.* В графовой модели основными объектами являются узлы и связи между ними. Каждый узел обладает уникальным ключом и вектором характеристик. Ключом связи выступают имя связи и ключи узлов, между которыми проводится эта связь, причем первым указывается ключ узла, из которого направлена связь. Это правило необходимо для отображения направления связи. Название связи обязательно указывать только для моделирования мультиграфов, для обычных графов этот атрибут необязательный.

Связь может обладать весами или иными свойствами, которые, как и в узлах, представляются как вектор характеристик. Каждая связь относится только к двум узлам, но узлы могут иметь несколько связей.

Абстрактная диаграмма графовой модели представлена на рисунке 12.

В качестве примера рассмотрим предпочтение покупателем пунктов выдачи. Как приведено на рисунке 13, в качестве веса связи «Предпочитает» выступает число доставок заказов, оформленных покупателем в конкретный пункт выдачи. При этом предпочитаемых пунктов выдачи может не быть, если покупатель еще не оформлял доставки, или их может быть несколько.

*Реляционная модель.* Реляционную модель в абстрактном виде можно представить как множество зависимых или независимых сущностей, обладающих ключами и некоторыми неключевыми атрибутами, как показано на абстрактной модели на рисунке 14.

База данных в реляционной модели может быть легко представлена в виде диаграмм предложенной нотации, как показано на рисунке 15.

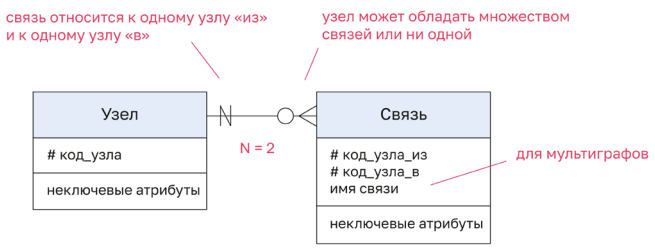



*Рисунок 12 – Абстрактная диаграмма графовой модели данных*

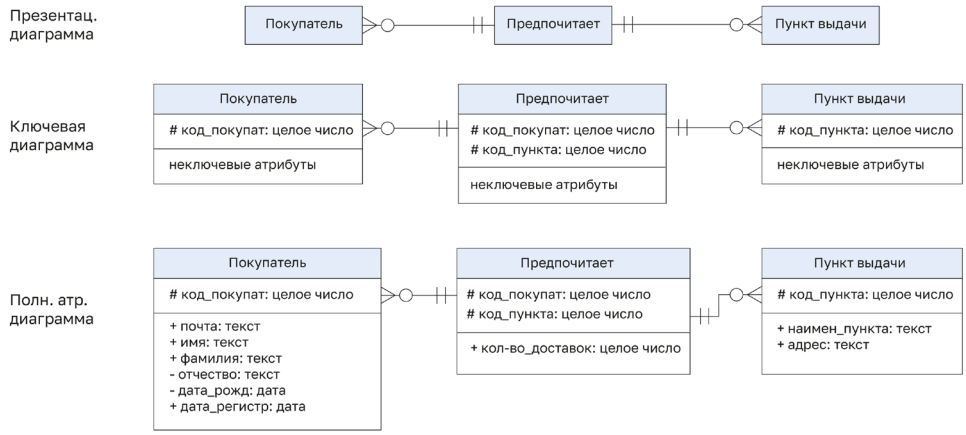



*Рисунок 13 – Логическая диаграмма графовой модели данных*

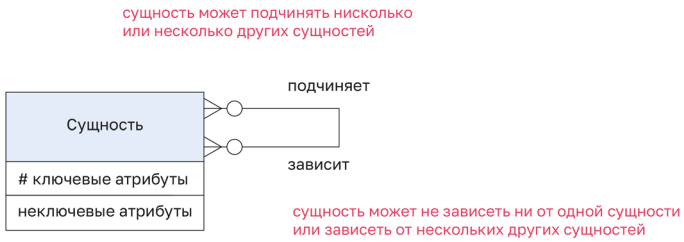



*Рисунок 14 – Абстрактная диаграмма реляционной модели данных*

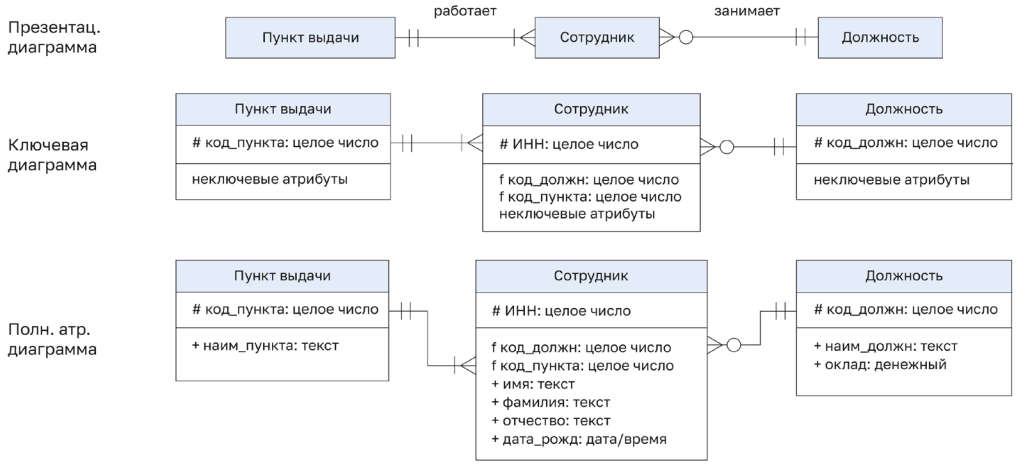



*Рисунок 15 – Логическая диаграмма реляционной модели данных*

**Обсуждение.** Нотация, с помощью которой возможно моделирование всех основных видов *NoSQL* баз данных, представляется более универсальным инструментом, чем решения, позволяющие моделировать один или два вида. Кроме того, в представленной нотации учтены недостатки и достоинства других работ. Так, в исследовании [9] нотация моделирования документных моделей предполагает отображение встроенных документов без указания атрибутов, т.е. на высоком уровне абстракции, а более подробные диаграммы, с указанием атрибутов, не содержат информации о встроенных документах. Помимо этого, даже на детальных диаграммах не предполагается указание типов атрибутов. Аналогичное замечание справедливо и в отношении [8]. В работе [7], также посвященной разработке нотации моделирования документных баз данных, напротив, типы атрибутов и встроенные документы предлагается указывать наглядным и легко читаемым образом. Однако к серьезным недостаткам нотации [7] можно отнести отсутствие символов, обозначающих кардинальности связей.

В данной работе документные базы данных предлагается моделировать схожим с [7] образом, более лаконичным и информативным, чем в [9], но с детальными обозначениями связей. Логические диаграммы графовой базы данных, представленные в исследовании [10], весьма громоздкие, однако значительным достоинством этой работы можно

назвать идею указывать не только типы, но и виды атрибутов. Эта идея нашла применение в настоящем исследовании.

Предложенная графическая нотация показала свою эффективность при моделировании различных типов нереляционных БД, используя в целом уже привычные для разработчиков графические примитивы и маркеры видов атрибутов. Анализ рисунков 5-15 позволяет заключить, что визуальное моделирование схем нереляционных БД позволяет в краткой и понятной разработчикам форме представить основные сущности предметной области, их структуру, возможные типы и виды атрибутов, способы организации данных, а также отношения между рассматриваемыми сущностями.

Несмотря на гибкость структуры нереляционных БД, такие базы данных строятся на основе бизнес-потребностей организаций и предприятий, их использующих, поэтому основные требования к используемой модели данных и подлежащей сбору, хранению и обработке информации определяются заранее на этапе анализа предметной области. Указанные требования к данным необходимо фиксировать и визуализировать для: 1) получения обратной связи от представителей бизнеса, 2) обсуждения и уточнения модели внутри группы разработчиков, 3) последующего документирования разработанной БД, 4) легкого включения в процесс дальнейшей разработки и сопровождения новых членов команды. С учетом того, что структура нереляционных баз данных может меняться достаточно часто, особенно важным представляется тщательное визуальное проектирование на всех этапах жизненного цикла БД. Необходимо принимать во внимание, что хороший проект БД не создается одномоментно, это всегда итерационный процесс, т.е. процесс создания ряда моделей БД, каждая из которых последовательно уточняет предыдущую.

На рисунке 3 представлен общий принцип формирования трехуровневых логических моделей БД предметной области (ПО). Так, на этапе предварительного анализа ПО целесообразно использовать простые презентационные диаграммы для отображения основных сущностей рассматриваемой ПО, на этапе уточнения взаимосвязей объектов ПО между собой имеет смысл использовать ключевые диаграммы, а на этапе детального анализа необходимо применять полные атрибутивные диаграммы с максимальной степенью детализации объектов и связей.

Предложенная нотация содержит ряд графических примитивов, вводимых впервые. В настоящее время в практике разработки документных БД использование документов, встроенных в другие документы, нашло широкое применение. Так, на рисунках 4 - 6 представлен примитив, используемый для обозначения встроенного документа. Однако также сохранена возможность использования ссылки на иной документ, которую зачастую используют разработчики по аналогии с реляционной моделью.

Особо стоит отметить введение в нотацию таких примитивов, как «Аналог представления» и «Связь с источником данных», представленных на рисунках 4, 11. В случае работы с колоночными СУБД необходимо четко разделять концептуальную модель ПО и модель, являющуюся промежуточным этапом между логической и физической моделями данных. Концептуальная модель, как и всегда, хранит общее представление об объектах ПО, но на этапе реализации разработчики зачастую существенно отходят от концептуальной модели, ориентируясь на потребности бизнеса в части повышения быстродействия наиболее часто используемых запросов. В случае работы с колоночными БД чаще всего основные сущности ПО формируются для удовлетворения текущих бизнес-запросов, что приводит к утрате концептуальной модели как таковой. Предложенная в работе нотация за счет использования указанных примитивов позволяет, с одной стороны, сохранить целостную концептуальную модель ПО, что будет необходимо при смене концепции бизнес-запросов или возникновении новых потребностей бизнеса, а с другой стороны – визуализировать все сущности и их структуру, необходимые для реализации текущих бизнес-требований. Данный подход подобен подходу реляционных БД, которые четко разделяют понятия «Таблица» и «Представление». Различие же с колоночными СУБД обусловлено тем, что в данном случае не существует «Представлений», а вся необходимая информация разделяется по таблицам колоночной БД с неизбежным в данном случае дублированием информации.

Еще один введенный примитив «Кардинальность строго *N*» будет полезен для моделирования различных ограничений ПО (рис. 4, 12). Так, в случае графовой модели использование данного примитива позволяет указать, что ребро – это связь между двумя узлами.

Для моделирования БД «ключ-значение» предусмотрено использование ключей сортировки, если таковые поддерживаются планируемой к использованию СУБД (рис. 9), в случае же смены СУБД упомянутые ключи легко могут быть перенесены в список неключевых атрибутов рассматриваемой сущности.

Необходимо отметить, что в настоящее время не существует программных инструментов, позволяющих выполнять визуальное моделирование типов баз данных, отличных от реляционных. Предлагаемая графическая нотация при ее реализации в виде программного пакета для визуального моделирования сможет заполнить имеющийся пробел на рынке ПО, что в свою очередь повысит скорость разработки визуальных моделей БД, а также снизит риск появления типичных ошибок моделирования. Безусловно, снижение ошибок моделирования возможно лишь в случае добавления к визуальному построителю средств синтаксического контроля

использования примитивов, аналогично подобным средствам, представленных в ряде визуальных построителей моделей для реляционных БД.

**Выводы.** Предложенная унифицированная графическая нотация позволяет строить визуальные логические модели БД, относящихся к основным нереляционным моделям данных. Использование комплексного типа данных помогает сохранить баланс между гибкостью *NoSQL* структуры данных и необходимостью визуализации схемы базы данных. Выбранные символы обладают наглядностью и интуитивно понятны, кроме того, они уже знакомы большинству специалистов, а значит, их применение не будет составлять большого труда и не потребует значительных затрат времени на предварительное изучение нотации с нуля.

Благодаря наличию единой унифицированной нотации взаимодействие разработчиков будет упрощено, разработанные в ходе проектирования базы данных диаграммы могут быть внесены в сопроводительную документацию и использоваться для поддержки базы данных.

В дальнейших работах предполагается исследование возможностей применения разработанной нотации для моделирования пространственных, мультимодельных и баз данных временных рядов, а также разработка онлайн-редактора моделей данных на базе разработанной нотации.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Принципы организации распределенных баз данных / Ёсу М.Т., Вальдуриес П.; пер. с англ. А.А. Слинкина. – М.: ДМК Пресс, 2021. – 672 с.: ил.

2. Vera-Olivera H. и др. Data Modeling and NoSQL Databases - A Systematic Mapping Review // ACM Comput. Surv. – 2022. – Т. 54. – № 6. – С. 1-26.

3. Paneque M. и др. An ontology-based secure design framework for graph-based databases // Computer Standards & Interfaces. – 2024. – Т. 88. – С. 103801.

4. Storey V.C., Song I.-Y. Big data technologies and Management: What conceptual modeling can do // Data & Knowledge Engineering. – 2017. – Т. 108. – С. 50-67.

5. Awan T. How to Draw NoSQL Data Model Diagram? [Электронный ресурс]. URL: https://www.techighness.com/post/how-to-draw-no-sql-data-model-diagram/ (дата обращения: 01.05.2024).

6. Palagashvili A.M., Stupnikov S.A. Reversible Mapping of Relational and Graph Databases // Pattern Recognit. Image Anal. – 2023. – Т. 33. – № 2. – С. 113-121.

7. Smirnov M.V., Tolmasov R.S. Graphical Notation for Document Database Modeling // Otkryt. obraz. (Mosk.). – 2021. – Т. 25. – № 5. – С. 50-60.

8. Chaves D., Malinowski E. Document Data Modeling: A Conceptual Perspective Communications in Computer and Information Science. / под ред. T. Welzer и др. Cham: Springer International Publishing, 2019. – С. 19-27.

9. Olivera H.V. и др. Data Modeling for NoSQL Document-Oriented Databases// Symposium on Information Management and Big Data, 2015.

10. De Sousa V.M., Cura L.M.D.V. Logical Design of Graph Databases from an Entity-Relationship Conceptual Model // Proceedings of the 20th International Conference on Information Integration and Web-based Applications & Services. – 2018. – С. 183-189.

11. Ромакина О.М., Билятдинов К.З., Жуков Г.К., Алдошин В.М. О выборе мультимодельной системы управления базами данных // Вестник воздушно-космической обороны – 2024. – № 1(41). – С. 93-99 .

12. Клемешева А.С., Ромакина О.М. Разработка графической нотации моделирования NoSQL баз данных // Сборник тезисов. XIII Конгресс молодых ученых ИТМО, 2024.

13. Технологии проектирования баз данных. / Осипов Д.Л. – М.: ДМК Пресс, 2019. – 498 с.

14. Ковалев, А.Д. Базы данных: учебное пособие / А.Д. Ковалев – Саратов: Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, 2010. – 275 с.

15. Chen P.P.-S. The entity-relationship model-toward a unified view of data // ACM Trans. Database Syst. 1976. – Т. 1. – № 1. – С. 9-36.

16. Kusiak A., Letsche T., Zakarian A. Data modelling with IDEF1x // International Journal of Computer Integrated Manufacturing. – 1997. – Т. 10. – No 6. – С. 470-486. DOI: 10.1080/095119297131039.

17. Язык UML. Руководство пользователя / Буч Г., Рамбо Д., Джекобсон А.; пер. с англ. – М.: ДМК, 2000. – 432 с.

18. Базы данных. Проектирование, реализация и сопровождение. Теория и практика. 3-е издание. / Т.Коннолли, К.Бегг; пер. с англ. – М.: Издательский дом "Вильяме", 2003. – 1440 с.: ил. – Парал. тит. англ.

19. Hitchman S. The Details of Conceptual Modelling Notations are Important – A Comparison of Relationship Normative Language // CAIS. 2002. Т. 9.

20. Puja I., Poscic P., Jaksic D. Overview and Comparison of Several Relational Database Modelling Metodologies and Notations // 2019 42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO). – 2019. – С. 1641-1646.

*Статья поступила в редакцию 06.05.2024*
*Статья принята к публикации 17.06.2024*

УДК 004.4'2
EDN: QAMNDY

**МЕТОД РАСЧЕТА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ**

© Автор(ы) 2024

SPIN: 3992-6024
AuthorID: 754564
ORCID: 0009-0002-2952-4302

**ПЫШКИНА Ирина Сергеевна,** кандидат технических наук,
доцент кафедры «Информационно-вычислительные системы»
*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*
*(440028, Россия, Пенза, ул. Германа Титова, д. 28., e-mail: glazycheese@gmail.com)*

SPIN: 4120-2022
AuthorID: 1178219
ORCID: 0009-0006-6680-4273

**МАКСИМОВ Ярослав Александрович,** аспирант кафедры «Программирование»
*Пензенский государственный технологический университет*
*(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11, e-mail: iamyaroslavmaximov@yandex.ru)*

SPIN: 5470-1289
AuthorID: 650911
ORCID: 0000-0002-3358-4394

**МАРТЫШКИН Алексей Иванович,** кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Программирование»
*Пензенский государственный технологический университет*
*(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11, e-mail: mai@penzgtu.ru)*

**Аннотация**. В современном мире, где скорость развития программного обеспечения в области веб-приложений достигла таких темпов, что каждый год появляются различные технологии, позволяющие рядовым пользователям наслаждаться плавной работой и отзывчивостью веб-сервисов. Современные пользователи уже давно привыкли к тому, что система должна работать без сбоев и неисправностей. Даже малейшие задержки или неудовлетворительный пользовательский опыт могут привести к утрате интереса со стороны пользователей и, в конечном итоге, к потере активной аудитории. Понятие производительности веб-приложений охватывает широкий спектр аспектов, включая, но не ограничиваясь, время загрузки страниц, скорость ответа сервера, отзывчивость интерфейса, и эффективное использование ресурсов как клиента, так и сервера. Стремление к оптимизации каждого из этих аспектов становится необходимостью для обеспечения удовлетворения требований пользователей и поддержания конкурентоспособности в современном рынке веб-приложений. Все вышеперечисленные особенности учитываются крупными компаниями, когда речь идет об удобстве пользования их системой, ее отзывчивости и работе в целом. Технологические гиганты стараются минимизировать ситуации, когда система не отвечает на запросы пользователя, путем адаптирования опыта других компаний или популярных трудов известных разработчиков. В рамках данной работы был проведен анализ метрик производительности веб-приложений, на основании которых в свою очередь была сформирована формула расчета производительности для клиент-серверных веб-приложений. Исследование данного вопроса является важным аспектом для современных веб-приложений, так как результаты данного исследования могут использоваться для создания программного обеспечения. Описанная разработка будет иметь большой практический смысл для веб-разработчиков, имеющих такую цель как улучшить производительности их проектов тем самым повышая качество сервиса и привлекая новых клиентов.

**Ключевые слова**: производительность веб-приложений, тестирование производительности, веб, веб-приложения, анализ производительности, перформанс, метрики, одностраничные приложения, тестирование веб-приложений, производительность, оптимизация веб-приложений.

**METHOD FOR CALCULATING WEB APPLICATION PERFORMANCE**

© The Authors 2024

**PYSHKINA Irina Sergeevna,** candidate of technical sciences,
associate professor of "Information Computing Systems" Department
*Penza State University of Architecture and Construction*
*(440028, Russia, Penza, Gherman Titov street, 28, e-mail: glazycheese@gmail.com)*
**MAXIMOV Yaroslav Alexandrovich**, postgraduate student of Programming Department
*Penza State Technological University*
*(440039, Russia, Penza, Baydukova passage/Gagarina street, 1a/11, e-mail: iamyaroslavmaximov@yandex.ru)*
**MARTYSHKIN Alexey Ivanovich,** candidate of technical sciences, docent, head of Programming Department
*Penza State Technological University*

*(440039, Russia, Penza, Baydukova passage/Gagarina street, 1a/11, e-mail: mai@penzgtu.ru)*

**Abstract**. In today's world, where the speed of software development in the field of web applications has reached such a pace that every year, various technologies are emerging that allow ordinary users to enjoy the smooth operation and responsiveness of web services. Modern users have long been accustomed to the fact that the system should work without failures or malfunctions. Even the slightest delays or poor user experience can lead to a loss of interest on the part of users and, ultimately, the loss of an active audience. The concept of web application performance covers a wide range of aspects, including, but not limited to, page load time, server response speed, interface responsiveness, and efficient use of both client and server resources. Striving to optimize each of these aspects is becoming a necessity to ensure user satisfaction and competitiveness in today's web application market. All of the above features are taken into account by large companies when it comes to the ease of use of their system, its responsiveness and overall performance. Tech giants try to minimize situations where the system does not respond to user requests by adapting the experience of other companies or the popular works of well-known developers. As part of this work, an analysis of web application performance metrics was carried out, on the basis of which, in turn, a formula for calculating performance for client-server web applications was formed. Research on this issue is an important aspect for modern web applications, since the results of this research can be used to create software that can be used to measure the performance of web applications. Such development will be useful for web developers who have the goal of improving the performance of their projects, thereby increasing the quality of service and attracting new clients.

**Keywords**: web application performance, performance testing, web, web applications, performance analysis, performance, metrics, single page applications, web application testing, performance, web application optimization.

***Для цитирования:*** *Пышкина И.С. Метод расчета производительности веб-приложения / И.С. Пышкина, Я.А. Максимов, А.И. Мартышкин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 2(66). – С. 43-48. – EDN: QAMNDY.*

**Введение.** В современном мире информационных технологий производительность веб-приложений играет одну из важных ролей. Просадка по производительности может вести к тому, что клиенты будут отказываться от использования этого сервиса [1, 2]. Как следствие из этого проведение правильного и качественного расчета производительности должно быть обязательным для обеспечения бесперебойной работы сервиса. Учитывая всю важность стабильной работы современных веб-приложений в рамках данной статьи, была поставлена цель, которая заключается в разработке метода измерения производительности клиент-серверных приложений, в котором будут приниматься во внимание узконаправленные метрики клиентской части веб-приложений (время отрисовки, время генерации и т.д.).

**Методология.** Данный метод измерения производительности веб-приложений представляет собой совместное использование измерений на стороне клиента и сервера. Предложенный метод позволяет измерять время ответа и декомпозирует результат на три составляющие: передачу, генерацию и отображение.

Для того, чтобы реализовать такой подход необходимы следующие компоненты:

1. Веб-страницы, которые генерируемые сервером или статическим генератором сайтов и, которые имеют возможность доступа к программному интерфейсу браузера.

2. Логи сервера или журнал, хранящий информацию времени, затраченном сервером на обработку каждого запроса от клиентов.

3. Прокси-сервер, осуществляющий измерение времени, прошедшего между запросом *HTML*-страницы и загрузкой ее ресурсов и, который расположен между клиентом и сервером.

Данный подход изображен на рисунке 1.

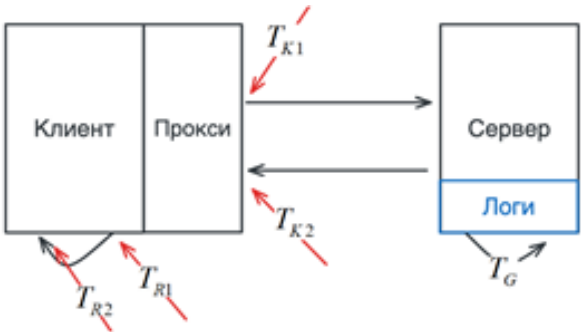



*Рисунок 1 – Общая схема взаимодействия компонентов системы для расчета производительности клиент-серверных веб-приложений*

Для начала необходимо ввести базовые обозначения, которые будут описывать временные характеристики.

Время отрисовки страницы в браузере ($T_R$) – отрезок времени от начала отображения первых элементов веб-страницы в браузере до ее полной загрузки.

Время генерации ($T_G$) – время, затраченное на обработку всех пользовательских запросов на загрузку сгенерированной веб-страницы.

Время простоя ($T_{PR}$) – промежуток времени между последовательными запросами, когда предыдущий запрос не обрабатывается и сервер ожидает новых запросов.

Время обработки ($T_{OBR}$) – временной промежуток, в течение которого сервер обрабатывает запрос пользователя для конкретной *HTML*-страницы или ее

встроенного элемента.

Время ответа ($T_{OTV}$) – время, прошедшее с момента отправки запроса пользователя на получение веб-страницы до полного отображения страницы.

Время обслуживания ( $T_{OBSL}$ ) – время, прошедшее с момента отправки *HTML*-страницы или ее встроенного элемента до получения соответствующего отклика со стороны сервера.

Время работы сервера ($T_{SERV}$) – время с момента отправки первого байта запроса пользователя до получения последнего байта соответствующего отклика со стороны сервера.

Время, затраченное на отправку и получение объектов, запрошенных сервером ($T_{ZO}$) – временной интервал, необходимый для передачи всех запросов пользователя и откликов сервера, связанных с веб-страницей.

Рисунок 1 демонстрирует клиент-серверное взаимодействие, в котором используются компоненты для измерения производительности веб-приложений. Важно отметить, что в процессе определения производительности клиент-серверного приложения все значения времени представлены миллисекундах. Это обусловлено тем, что операции измерения, которые предоставляют окружения (например браузер и его программный интерфейс для *JavaScript* или набор стандартных библиотек *Java*), используют миллисекунды. Дополнительно использование значений времени в миллисекундах позволяет определить точное время обращения к сервер, тем самым давая точный результат. Важными частями данной системы являются логи (или журнал доступа к серверу) и прокси-сервер для отслеживания времени получения ответа от основного сервера. Основываясь на таком взаимодействии и работе компонентов, были выведены следующие формулы:

$$T_{OTVSERV} = T_{R2} - T_{K1}, \quad (1)$$

$$T_{RB} = T_{R2} - T_{R1}, \quad (2)$$

$$T_{PD} = \left(T_{K2} - T_{K1}\right) - T_{G}, \quad (3)$$

в которых используются следующие обозначения:

$T_{OTVSERV}$ – время, когда произошел отклик от сервера,

$T_{RB}$ – время, за которое веб-страница была сформирована,

$T_{PD}$ – время передачи данных,

$T_{K1}$ – время отправки запроса на сервер,

$T_{K2}$ – время, затраченное на получение прокси-сервером ответа от сервера,

$T_{R1}$ – время начала отображения содержимого страницы в браузере,

$T_{R2}$ – время завершения отображения контента в браузере,

$T_{G}$ – время генерации ответа на сервере.

В момент запроса клиентом веб-страницы его запрос будет пропущен через прокси-сервер, где произойдет фиксация времени запроса. После этого запрос пропускается далее на сервер для последующей обработки. В заключение, клиент получает ответ. Все шаги сохраняются в логах сервера. Если клиент запрашивает веб-страницу, его запрос направляется на специализированный прокси-сервер, который точно устанавливает время, когда произошло это действие. После этого запрос идет дальше на сервер. В соответствие со стандартом расширенных полей файла журнала *W3C*, необходимо, чтобы формат файла журнала содержал поле «Затраченное время», куда записывается время, которое сервер затратил на обработку запроса. После получение сервером ответа, еще до обработки его клиентским браузером, время его получения регистрируется на прокси-сервере. Этот процесс распространяется на все встроенные ресурсы, в результате чего время запроса и получения каждого ресурса также проходит процедуру регистрации прокси-сервером. Клиентская часть веб-приложения оценивает и записывает время, затраченное на формирование веб-страницы с использованием программного интерфейса *Performance*.

Хотя измерения времени формирования веб-страницы и общего времени ответа довольно просты, измерение времени генерации и передачи имеют следующие нюансы:

1. Со стороны клиента, время, прошедшее между отправкой запроса и получением соответствующего ответа, известное как время обслуживания $T_{OBSL}$, фактически состоит из двух основных компонентов: времени, в течение которого сервер обрабатывает запрос и формирует ответ $T_{OBR}$, и времени, затраченного на передачу запроса и ответа по сети $T_{ZO}$. Следовательно, время передачи конкретной запрошенной страницы или ресурса равно разнице между временем ответа сервера $T_{OBSL}$ и временем отправки запроса клиентом для данной страницы или ресурса $T_{OBR}$.

2. Сервер может начать отправку ответа клиенту, даже если обработка запроса клиента еще не завершена. Это означает, что процессы генерации страницы и ее передачи могут выполняться параллельно. Вычитание $T_{OBSL}$ и $T_{OBR}$ не даст полного представления о процессе обслуживания $T_{ZO}$.

3. Между последовательными запросами возникают промежутки, когда предыдущий запрос не обрабатывается или не обслуживается. Это время простоя между запросами $T_{PR}$ может быть использовано клиентом для установки нового соединения с сервером для отправки параллельных запросов. Или клиент может подождать, пока браузер отобразит страницу, прежде чем делать дополнительные запросы. Следовательно, вычитание из времени, прошедшего между отправкой первого запроса и получением последнего байта ответа, а именно времени обслуживания на сервере $T_{SERV}$, дает значение, которое отражает комбинацию $T_{ZO}$ и $T_{PR}$, а не только сам $T_{ZO}$.

4. Один объект может быть запрошен, пока другие обслуживаются сервером и пока клиент отображает другие объекты. Это связано с тем, что веб-браузеры, например *Internet Explorer*, допускают до четырех

одновременных подключений к одному серверу *HTTP/1.0* и два одновременных подключения к одному серверу *HTTP/1.1*. Дополнительно популярный браузер *Chrome* имеет ограничение в 6 подключений на имя хоста и максимум 10 подключений [5]. По сути, это означает, что он может одновременно обрабатывать 6 запросов, поступающих с одного и того же хоста, и одновременно обрабатывать еще 4 запроса, поступающих с другого хоста. Таким образом, клиентский браузер имеет возможность одновременно запрашивать несколько объектов с одного сервера. Более того, запрос на объект может быть выполнен до того, как ранее запрошенные объекты будут получены или полностью загружены. В результате временные интервалы передачи и обработки для различных объектов могут перекрываться.

На рисунке 2 представлен идеальный сценарий клиент-серверного взаимодействия, где существует одна страница и один дополнительный ресурс, который встроен в нее. Отличительной особенностью взаимодействия в рамках данной диаграммы является то, что отправленные с клиентской части веб-приложения запросы, их обработка и ответы сервера не пересекаются.

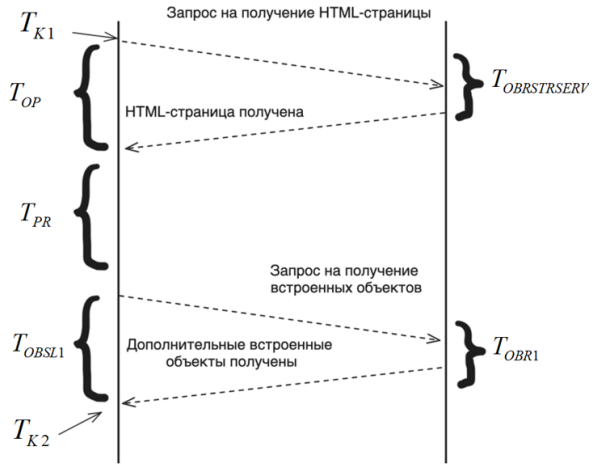



*Рисунок 2 – Выполнение непересекающихся между собой операций*

Основываясь на «идеальном» взаимодействии между узлами, которые указаны на рисунке 2, можно составить формулы

$$T_{OP} = T_{PS} + T_{OBRSTRSERV}, \quad (4)$$

$$T_{OBSL1} = T_{ZO1} + T_{OBR1}, \quad (5)$$

$$T_{SERV} = T_{OP} + T_{OBSL1} + T_{PR} = T_{PS} + T_{OBRSTRSERV} + T_{ZO1} + T_{OBR1} + T_{PR}, \quad (6)$$

в которых приняты следующие обозначения:

$T_{PS}$ – промежуток времени, в течение которого была передана страница,

$T_{OP}$ – промежуток времени с момента отправки и до момента, когда была получена веб-страница,

$T_{SERV}$ – общее время, за которое произошло обслуживание запроса,

$T_{ZO1}$ – время, за которое был передан дополнительный ресурс веб-страницы,

$T_{OBRSTRSERV}$ – время, которое затратил сервер на обработку *HTML*-страницы,

$T_{OBR1}$ – время, которое затратил сервер на обработку дополнительного встроенного ресурса веб-страницы,

$T_{PR}$ – время, использованное для представления простая между выполнением запросов.

Если приводить описанные раннее формулы для веб-страницы с определенным количеством дополнительных ресурсов будет получено следующее выражение:

$$T_{SERV} = (T_{PS} + T_{OBRSTRSERV}) + \sum_{i=1}^{n} T_{PERDOPRES} + \sum_{i=1}^{n} T_{OBRDOPRESSERV} + \sum_{i=1}^{n} T_{PR} \quad (7)$$

Описывая детали, которые содержит формула 7, важно учитывать тот факт, что $T_{PERDOPRES}$ является временем, за которое будет передан один дополнительный встроенный ресурс веб-страницы, а $T_{OBRDOPRESSERV}$ считается временем, за которое была выполнена обработка одного дополнительного встроенного в веб-страницу ресурса на сервере.

$\sum_{i=1}^{n} T_{PR}$ является общим временем, при котором происходит простой между запросами.

Использование представленной выше формулы может быть обосновано в случаях, когда временные интервалы на передачу и обработку дополнительных объектов не пересекаются. То есть они идут друг за другом. Но бывают ситуации, когда случается исход событий, при котором запросы перекрывают друг друга, и в таком случае формула может дать неточные результаты. Рисунок 3 является ярким примером общения клиентской части веб-приложения и серверной части веб-приложения, где запросы накладываются друг на друга и тем самым перекрываются.

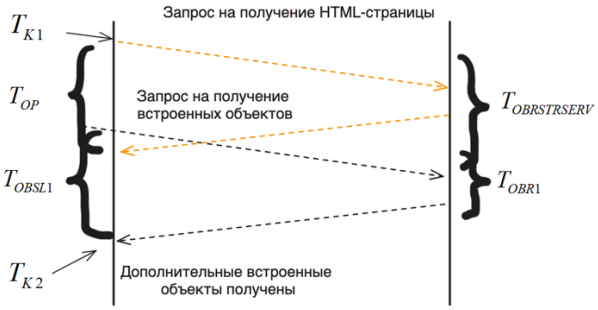



*Рисунок 3 – Пример накладывания запросов друг на друга*

**Результаты.** Рисунок 3 точно описывает как пересекаются запросы $T_{OP}$ и $T_{OBSL1}$, что является более сложным сценарием для проведения измерений. Использование формулы 7 приведет к тому, что полученное расчитанное значение $T_{SERV}$ будет превышать фактическое значение $T_{SERV}$. Дополнительно не исключается ситуация, когда в момент отправки сервером ответа на клиент, сервер сам по себе может паралельно обрабатывать запрос не смотря на то, что серверные логи, в которых хранятся записи о доступе к серверу, добавляют новую запись после реального завершения запроса. Такая ситуация может вести к так нанзываемой гонке состояний при которой система для измерения производительности клиент-серверного приложения будет работать

неправильно.

Не исключена ситуация, когда при наступлении определенных условий может возникнуть ситуация, когда время $T_{OBR}$ может быть больше времени $T_{OBSL}$. Это приведет к тому, что значение переменной $T_G$ будет рассчитываться как сумма всего времени обработки на сервере. Это может привести к тому, что время $T_G$ также окажется больше, чем $T_{SERV}$. Наступление такого события вероятно для динамически генерируемых веб-страниц, в которых значение времени $T_{OBR}$ будет иметь большую величину. Более того очень высокая скорость передачи данных может увеличить вероятность подобных отклонений. В любом случае, если сумма всех значений $T_{OBSL}$ и $T_{OBR}$ превышает значение $T_{SERV}$, это будет противоречить определению $T_{SERV}$ как времени обслуживания на стороне сервера. Такая ситуация является камнем преткновения на пути ведения расчетов.

В рамках решения проблемы пересекающихся запросов для правильной работы системы измерения производительности клиент-серверного приложения не существует способа четко разделять процессы генерации, передачи или рендеринга веб-страницы как трех отдельных сущностей. Они не являются независимыми друг от друга, и поэтому отсюда можно сделать заключение, что их точное измерение представляет сложность.

Одним из возможных решений этой проблемы является использование дополнительных данных в логах сервера, в который вносятся записи о доступе извне к нему. Вводится специальная метка, которая будет отражать время с точностью до миллисекунд, в рамках которого было совершено обращение к серверу. Используя данный подход можно идентифицировать перекрывающиеся временные интервалы между обработкой и передачей данных сервером, но подобный подход требует значительных компьютерных мощностей и дополнительно для этого необходима синхронизация времени клиентской и серверной частей.

Использование предложенного подхода накладывает на разработчика определенную ответственность, по той причине, что он должен учитывать, что при применении описанного подхода необходимо взвесить ввиду того, что для его использования необходимы большие затраты в рамках компьютерных вычислений. Что может вести к необходимости горизонтального масштабирования системы.

Резюмируя вышеупомянутые замечания, выведены следующие определения для времени генерации и передачи веб-страницы. Время генерации определяется с помощью формулы 8

$$T_G = T_{OBRSTRSERV} + \sum_{i=1}^{n} T_{OBRDOPRESSERV}, \quad (8)$$

в которой $T_{OBRSTRSERV}$ – является промежутком времени, в рамках которого веб-страница будет обработана сервером, $T_{OBRDOPRESSERV}$ – промежуток времени, за который выполнена обработка одного встроенного в веб-страницу дополнительного ресурса на сервере.

Время, за которое будет передана веб-страница, описывается формулой 9

$$T_{ZO} = T_{OP} + \sum_{i=1}^{n} T_{OBSDOPOB} \quad (9)$$

в которой $T_{OP}$ – промежуток времени с момента отправки и до момента, когда была получена веб-страница, $T_{OBRDOPOB}$ – время, в рамках которого обрабатывается объект который встроен в веб-страницу.

Применение формулы 9 позволит оценить время передачи, основанном на общем времени обработки *HTML*-страницы и всех ее элементов.

Формулы могут быть интегрированы в программный код, для получения данных и последующей их агрегации. Важно отметить, что измерения должны происходить как на клиенте, используя стандартный браузерный программный интерфейс, так и время обработки запроса на сервере. Для демонстрации работы данного метода были получены экспериментальные данные, представленные в таблице 1.

*Таблица 1 – Измерение простой веб-страницы*

| Измерение | Первый доступ к странице | Последующий доступ к странице |
|---|---|---|
| $T_{OTV}$ | 5405 | 483 |
| $T_R$ | 2320 | 443 |
| $T_{ZO}$ | 2233 | 89 |
| $T_G$ | 4471 | 272 |
| $T_{SERV}$ | 4731 | 445 |
| $T_{ZO} : T_G$ | 0.5 | 0.33 |

Были проведены замеры простой веб-страницы, сгенерированной на сервере, используя программные интерфейсы браузера и прокси-сервер без использования кэширования.

Страница, которая использовалась при содержала одно изображение, одно поле для ввода и одну кнопку при первом и последущем доступе к ней пользователем.

**Обсуждение.** Измерения, полученные в таблице 1 показывают, что время ответа ($T_{OTV}$) при первичном доступе к странице больше, чем последующее в 11.2 раза, что говорит нам о том, что запрос от клиента к браузеру был уже сгенерирован до этого, что ускорило последующую загрузку страницы. Подобное поведение можно заметить и для времени рендеринга страницы на клиентской части веб приложения ($T_R$).

Это говорит о том, что при первичной генерации страницы на сервера или первичной отрисовки на клиенте ($T_R$) время ответа всего будет больше.

Рассматривая результаты отношения времени, затраченного на отправку и получение объектов, запрошенных сервером и времени генерации ($T_{ZO}$:$T_G$), которое равно 0.5 можно с уверенностью сказать, что обработка на сервере играет ключевую роль в определении времени ответа для запроса для первого доступа к странице. Клиенту пришлось ждать намного дольше, чтобы получить первый ответ от сервера, чем последующий ответ. Это связано с длительным временем обработки первого запроса или генерирования веб-страницы на сервере. Дополнительно создание сервером веб-страницы ($T_G$) является относительно большим по сравнению со временем обработки встроенных объектов (рассчитанное в рамках $T_{ZO}$). В результате время обработки встроенных объектов становится наименее значимой частью общего времени ответа. Знания о том, что генерация страницы занимает большое количество времени, помогут разработчику произвести определенные оптимизации страницы, которые позволят улучшить показатели.

Измерение производительности веб-приложений – существенный компонент в процессе их создания и поддержки. Оптимизация работы системы, скорость загрузки страниц и отзывчивость интерфейса оказывают положительное воздействие на пользовательское восприятие, что способствует привлечению и удержанию аудитории [18]. Помимо этого, измерение производительности позволяет выявлять узкие места, проблемы с производительностью и отслеживать изменения в течение времени [19, 20]. Это обеспечивает возможность для разработчиков оперативно реагировать на проблемы и улучшать производительность на основе данных и метрик на каждом этапе разработки системы. Такой подход является стимулом для разработчиков, заботящихся о том, как веб-приложение работает после внесения изменений в код, влияющих на его функционирование в целом.

**Выводы.** В заключение отметим, что представленный в статье метод обладает способностью оценивать производительность веб-приложений, объединяя как клиентскую, так и серверную составляющие, что позволяет охватить обе стороны полноценного веб-приложения. Для работы по дальнейшему развитию метода можно внедрить дополнительные метрики как на стороне клиента (например, время первой отрисовки контента), так и на стороне сервера (например, время задержки). Также возможна ситуация, когда время $T_G$ и время обработки всех встроенных объектов $T_{ZO}$ может превышать время $T_{SERV}$. Возможным решением данной проблемы является, например, введение метрики эффективности запроса, которую нужно вычислить путем вычитания времени $T_{PR}$ из времени $T_{SERV}$. Этот подход сделает предложенный метод более точным и повысит его эффективность.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Barry P. Exploring New Frontiers in Web Performance. M.: Manning, 2020. – 160 с.
2. Липаев В.В. Обеспечение качества программных средств. Методы и стандарты. М.: Синтег, 2001. – 380 с.
3. Extended Log File Format [Электронный ресурс]. – URL: https://www.w3.org/TR/WD-logfile.html (дата обращения: 15.11.2023).
4. Performance – Web APIs | MDN [Электронный ресурс]. – URL: https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/Performance (дата обращения: 8.11.2023).
5. Blocking: The Web Performance Villain [Электронный ресурс]. – URL: https://bluetriangle.com/blog/blocking-web-performance-villain#:~:text=Chrome%20has%20a%20limit%20of,host%20at%20the%20same%20time (дата обращения: 20.11.2023).
6. Фаулер М. Рефакторинг: улучшение существующего кода. СПб: Символ-Плюс, 2003. – 432 с.
7. Афанасьев С.В., Воробьев В.И. Метрики для объектно-ориентированного проектирования сложных систем // Вестник гражданских инженеров, 2005. – № 4. – С. 118-123.
8. ISO/IEC 14598-5:1998 Информационные технологии. Оценка программного продукта. Часть 5. Процесс для блоков оценки.
9. Петров В.Н. Веб-разработка: основы и современные технологии. М.: СПб.: БХВПетербург, 2019 – 760 с.
10. McCall J., Richards P., Walters G. Factors in Software Quality // NTIS AD-A049-014, AD-A049-015, AD-A049-055. – 1977.
11. Шилдт Г.С: полное руководство, классическое издание: [перевод с английского] / Герберт Шилдт. – Москва [и др.]: Вильямс, 2018. – 699 с.
12. Максимов Я.А., Мартышкин А.И. Обзор современных программных решений в области измерения производительности клиентской части веб-приложений // Современные наукоемкие технологии. – 2021. – № 12-2. – С. 348-354.
13. Максимов Я.А., Мартышкин А.И. Влияние интернет-рекламы на производительность клиентской части веб-приложений // Современные наукоемкие технологии. – 2022. – № 11. – С. 52-56.
14. Грузин Н.А. Сравнение шаблонов проектирования архитектуры приложения: MVC, MVP и MVVM / Грузин Н.А. // Modern Science. – 2021. – № 1-1. – С. 434-440.
15. Delcev S., Draskovic D. Modern JavaScript frameworks: A survey study //2018 Zooming Innovation in Consumer Technologies Conference (ZINC). IEEE. – 2018. – С. 106-109.
16. Сергушичева А.П. Построение инструмента для функционального тестирования программ // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2023. – №. 1 (19). – С. 62-66.
17. Зазуля А.С, Сарин К.С., Сахарбеков Р.Д. Тестирование веб-приложений с помощью свободного программного обеспечения / Шарыгинские чтения. Материалы Всероссийской научной конференции ведущих научных школ в области радиолокации, радионавигации и радиоэлектронных систем передачи информации. – 2022. – Т. 1. – № 1. – С. 242-246.
18. Валитова Н.Л., Кремлева Э.Ш., Кашафутдинов Р.К. Перспективы применения технологии PWA для расширения e-learning систем на мобильные платформы // Образовательные технологии и общество. – 2020. – № 1.
19. Рыжов И. Автоматизированное тестирование производительности: инструменты и практика. [Электронный ресурс]. 2023. URL: https://gochadev.ru/2023/10/10/avtomatizirovannoe-testirovanie-proizvoditelnosti-instrumentii-praktika/ (Дата обращения: 10.12.2023).
20. Web vitals. [Электронный ресурс]. 2023. URL: https://web.dev/articles/vitals (Дата обращения: 25.12.2023).

*Статья поступила в редакцию 07.05.2024*
*Статья принята к публикации 17.06.2024*

УДК 004.65.656
EDN: DUKVVS

# РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ СТРУКТУРЫ БАЗЫ ДАННЫХ КОМПЬЮТЕРНОГО ГЕНЕРАТОРА ИЗОБРАЖЕНИЯ В СЕГМЕНТЕ ПЕРВОГО УРОВНЯ В *3D*-МОДЕЛИ ЗОНЫ ПОЛЕТА АВИАЦИОННОГО ТРЕНАЖЁРА

© Автор(ы) 2024
SPIN: 7733-6110
AuthorID: 958273
ORCID: 0000-0002-9983-7067
ScopusID: 57201443964

**КУВШИНОВА Ольга Александровна**, старший преподаватель кафедры «Информационно-вычислительные системы»

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, (445020, Россия, г. Пенза, ул. Германа Титова, д. 28, e-mail: oly791702@rambler.ru)*

**Аннотация.** Одной из актуальных задач авиационного тренажёростроения является обучения лётчиком решению навигационных задач в максимально возможном объёме. Такая постановка задачи требует конструирования *3D*-модели зоны полета размером до 1500×1500 км с размещением по всей площади *3D*-моделей реперных объектов достаточных для визуального контроля их пролёта в поворотных пунктах маршрута. Ранее в этом направлении были проведены исследования творческих коллективов под руководством Роганова В.Р. предложившего при распределении ресурсов компьютерного генератора изображения вместо распределения *3D*-моделей реперных объектов рассчитывать максимально возможное время обработки всех примитивов, из которых набираются *3D*-модели реперных объектов, что следует из списка литературы. С этой целью вся *3D*-модель зона полёта делится на сегменты. Это позволяет облегчить труд конструкторов и получить единицу площади, на которой может быть размещено разное число примитивов. Но время их обработки не должно превышать рассчитанное значение. Деление *3D*-модели района на сегменты должно отражаться в структуре базе данных. Тогда задачи разработки *3D*-модели зоны полёта позволяющая обучать лётчика решению навигационных задач сводится к поиску вариантов оптимального деления на сегменты и разработки методики создания структуры базы данных компьютерного генератор изображения отображающую деление *3D*-модели зоны полёта на сегменты. В данной статье приводится один из вариантов решения такой задачи.

**Ключевые слова:** задачи обучения лётчиков при полёте на авиационном тренажёре, пирамида видимости, структура базы данных компьютерного генератора изображения, запись сегмента первого уровня.

# DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR THE DATABASE STRUCTURE OF A COMPUTER IMAGE GENERATOR IN THE FIRST-LEVEL SEGMENT IN A *3D* MODEL OF THE FLIGHT ZONE OF AN AVIATION SIMULATOR

© Автор(ы) 2024
**KUVSHINOVA Olga Alexandrovna,** senior lecturer at the Department of Information and Computing Systems

*Penza State University of Architecture and Construction, (445020, Russia, 445020, Russia, Penza, st. Germana Titova, 28, e-mail: oly791702@rambler.ru)*

**Abstract.** One of the urgent tasks of aviation simulator construction is training the pilot to solve navigation problems to the maximum extent possible. This formulation of the problem requires the construction of a *3D* model of a flight zone measuring up to 1500×1500 km with the placement of reference objects sufficient for visual control of their flight at turning points of the route over the entire area of the *3D*-models. Previously, research in this direction was carried out on creative teams led by V.R. Roganov. who proposed, when distributing resources of a computer image generator, instead of distributing *3D* models of reference objects, to calculate the maximum possible processing time of all primitives from which *3D* models of reference objects are compiled, which follows from the list of references. For this purpose, the entire *3D* model of the flight area is divided into segments. This makes it possible to facilitate the work of designers and obtain a unit of area on which a different number of primitives can be placed. But their processing time should not exceed the calculated value. The division of the *3D* model of the area into segments should be reflected in the database structure. Then the task of developing a *3D* model of the flight zone, which allows training the pilot to solve navigation problems, comes down to finding options for optimal division into segments and developing a methodology for creating a database structure for a computer image generator that displays the division of the *3D* model of the flight zone into segments. This article provides one of the options for solving such a problem.

**Keywords:** tasks of training pilots when flying on an aviation simulator, visibility pyramid, computer image generator database structure, first level segment record.

***Для цитирования:*** *Кувшинова О.А. Разработка методики структуры базы данных компьютерного генератора изображения в сегменте первого уровня в 3D-модели зоны полета авиационного тренажёра / О.А. Кувшинова // XXI век:итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 2(66). – С. 49-54. – EDN: DUKVVS.*

**Введение.** Современные компьютерные генераторы изображения позволяют моделировать визуально наблюдаемые *3D*-модели реперных объектов [1], размещенные по всей, пощади *3D*-модели зоны полета размером до 1500×1500 км [2]. Для этого требуется разработать карту *3D*-модели зоны полета с целью обеспечить возможность во время учебных полетов решать навигационные задачи с визуальной ориентацией в поворотных пунктах маршрута [3] по расположенным там *3D*-моделей реперных объектов. Такой подход требует решение задачи перераспределение ресурсов компьютерного генератора изображения в каждый такт цикла режима реально времени, учитывая, что максимальная видимость *3D*-реперных объектов составляет 30 км [4] Качество визуально наблюдаемого изображения *3D*-модели зоны полета [5] зависит от наполненности *3D*-моделей реперных объектов.

$$N^{(PM)} \geq N^{(K)} \quad (1)$$

где $N^{(PM)}$ – численность реперных объектов;

$N^{(K)}$ – видимые реперных объектов в зоне полета.

Принято считать, что зона полета, размером от 400×400 до 1500×1500 км, является сегментом нулевого уровня $S^{(0)}$. Основная задача данной разработки заключается в создании трехмерной модели зоны полета, которая будет насыщена разнообразными реперными объектами, а также в максимальном извлечении примитивов из данной модели:

$$R_i^{(v)} \geq M_r\left(S_0^1\right), \quad (2)$$

$$R_i^{(v)} \geq M_r\left(S_0^1\right), \quad (3)$$

где $\left(S_0^1\right)$ – *3D*-модель зоны полета сегмента первого уровня;

$M_r$ – сумма всех видимы реперных объектов в *3D*-модели зоны полета.

Для распределения визуально наблюдаемых моделей зоны полета $S^{(0)}$, используют компьютерный генератор изображения (КГИ) [6], который воспроизводит на дисплее сформированное промежуточное двумерное изображение трехмерных объектов [7]. В итоге создается информативная система, отра-жающая реальную *3D*-модель зоны полета [8]. Обязательная *3D*-модель в авиационном тренажере $I^{(at)}(S^{(0)})$ обеспечивает возможность профессионально тренировать видимость летчика [9]. Структура базы данных компьютерного генератора изображения взаимодействует с технологическим процессом с распределением моделей реперных объектов

На рисунке 1 представлена структура оптической системы преобразования, используемой в авиационном тренажере. Эта система активизирует определенные аспекты человеческого зрения [10] через оптические устройства [11], направляя их в глаза пользователя [12]. При просмотре оптики специальные видеоряды *2D*-проекций *3D*-объектов создают впечатление *3D*-модели, что помогает пользователю развивать свой глазомер [13] и улучшать профессиональные навыки.

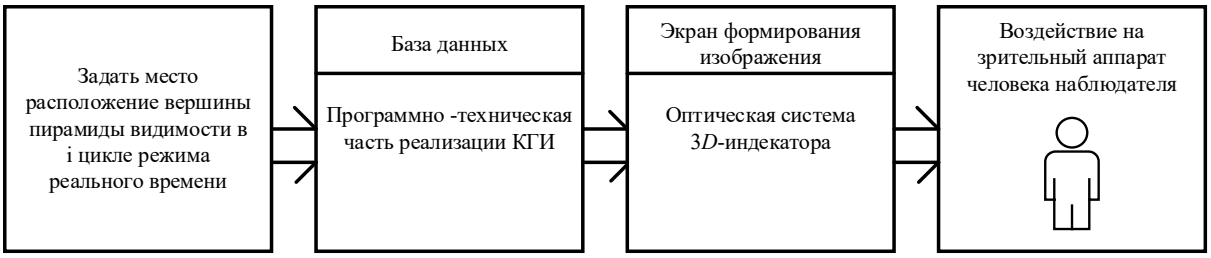



*Рисунок 1 – Распределение трехмерных изображений в авиационном тренажере*

Для создания изображений в реальном времени необходимо разработать структуру базы данных КГИ для занесения информации о *3D*-моделей реперных объектов. Трехмерная модель зоны полета представляет собой сегмент, описываемый геометрической формой, над которой возможны полеты летательных аппаратов с отображением реперных элементов. Сегмент начального уровня, обозначаемый как $S^0$, формирует основу модели зоны полета и может делиться на подсегменты различной сложности. В процессе сценарного анализа важно исключить записи сегментов базы данных, содержащих трехмерные модели объектов, чтобы обеспечить точность и эффективность процесса. Целью работы является распределение информационных ресурсов компьютерного генератора изображения в сегментах первого, где необходимо рассмотреть метод целочисленного программирования. Предпочтительно использовать метод Гомори для решения задачи. В статье приведены результаты поставленных задач.

**Методология.** Для обработки информационных потоков существует подход, заключающийся в распределении алгоритмов компьютерной графики с техническими средствами [14]. Результаты синтеза изображений с помощью этих алгоритмов сохра-

няются в базе данных для последующей записи [15]. Этот тип базы данных создается на основе разбиения трехмерной модели зоны полета на сегменты первого уровня, что обеспечивает управление информацией и нужными ресурсами для последующей обработки. Такое деление отображается в виде структуры базы данных [16].

Каждый имитатор, синтезирующий для лётчика визуально воспринимаемую информацию в виде изображения, обрабатывается в своей базе данных. В структуре базы данных $\xi$ занесена вся необходимая информация для синтеза моделей реперных объектов в виде видимых примитивов $P^{(v)}$.

$$\xi_i = \sum_{i=1}^{S} P^{(v)}, \tag{4}$$

где $S$ – число сегментов в базе данных

Каждые визуальные примитивы дополняются множеством вариантов текстур [17]. Размещение как визуальных элементов, так и их текстур индивидуальное. Структура базы данных $\xi$ должна обеспечить минимальное время $t_{min}$ для выбора необходимой информации с целью синтеза на экране, подключённом к компьютерному генератору изображения визуальной информации, отличной от визуальной информации, синтезируемой разными имитаторами.

Следовательно, необходимо определить методику разработки структуры базы данных:

1. Задать исходный размер *3D*-модели зоны полета.

2. Рассматривать трехмерную модель зоны полета как основной сегмент, который затем разделяется на сегменты первого уровня. Деление производится с целью на первом этапе процессе синтеза исключить из дальнейшей обработки сегментов, которые находятся более 30 км (рис. 2).

3. Определить возможно ли за основу время обработки взять все примитивы, которые обрабатываются за одно и тоже время.

4. Определить является ли задача исследованием операцией, конкретно задачей целочисленного программирования. Исходя из выше сказанного определяем целевую функцию и систему ограничения.

5. Найти оптимальные параметры для размера сегмента первого уровня.

Для размещения модели одного и того же реперного объекта, видимого через разные имитаторы в одном и том же месте модели внешней среды должны быть расположены в одном и том же сегменте в единой структуре базы данных компьютерного генератора изображения. Цикл обработки информации в компьютерном генераторе изображения происходит (рис. 3):

– сценарный процессор готовит файл на обработку;

– геометрический процессор синтезирует на плоскости экрана *2D*-проекции *3D*-подмоделей, попавших в пирамиду видимости;

– клипперный процессор обрезает части *2D*-проекции, выходящие за рамки экрана;

– видеопроцессор переводит цветные *2D*-проекции в сигналы *RGB* для каждого пикселя экрана.

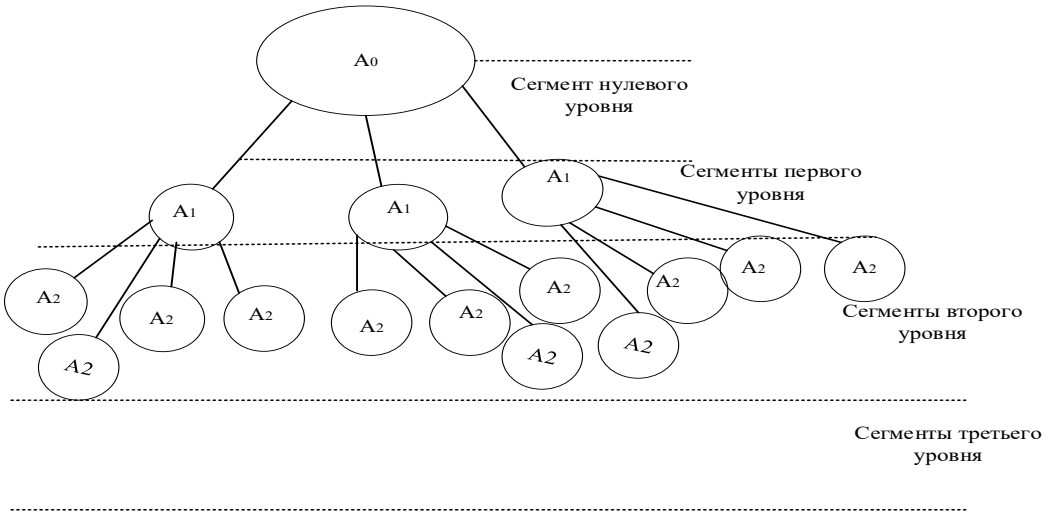



*Рисунок 2 – Схема деления сегментов на разных уровнях*




*Рисунок 3 – Распределение информации в компьютерном генераторе изображения до экрана формирования промежуточного изображения*

Для решения проблемы, возникающие при разработке формы и размеров сегментов нулевого уровня, затем под сегменты первого уровня, говорят о необходимости использования эргатического аппаратно-программного комплекса, получивший название имитатор визуальной обстановки. Который обеспечивает моментальный синтез изображений в реальном времени, отображая на экране видеоряд, переведенный из *2D*-проекции в трехмерную модель зоны полета попавшие *3D*-объекты в пирамиду видимости.

Разработанный метод деления *3D*-модели зоны полета на сегменты первого уровня, способствует на первом этапе распределения видеоряда из *2D*-проекции в *3D*-модели зоны полета исключать сегменты, которые не видны. Для деления *3D*-модели зоны полета разрабатывается методика структуры базы данных КГИ, где решается два противоречивых требования:

1. Задать минимальный размер сегмента первого уровня, чтобы как можно точнее описать след пирамиды видимости на *3D*-модели зоны полета (что предполагает использовать максимальное число примитивов типа охватывающая сфера по направлению или по дальности за счет сокращения числа видимых примитивов, что уменьшает число наблюдаемых моделей реперных объектов и их детализацию).

2. Синтезировать как можно большое число *3D*-моделей реперных объектов с максимально возможным уровнем детализации на фоне *3D*-модели зоны полета и распознавать как реальные *3D*-реперные объекты с вероятностью 89% и выше.

При этом получаем:

1. В рассмотренной трехмерной модели зоны полёта 400×400 км и сегмента размером 1 км потребуется 16000 примитивов. Чтобы определить количество визуальных примитивов, следует учитывать все реперные объекты $K_{pr}^{\ v} = N - 1600 - 100((N - 1600 - 5) / 4)$,

где:

$N$ – количество реперных объектов, попадающих в зону видимости пирамиды;

$S$ – область зоны полета (40×40 км);

$A_s$ – участок активного сегмента (10×10 км);

2. Имеем два граничных решения задачи распределения ресурсов компьютерного генератора изображения. В первом случае без деления сцены визуализации на сегменты, где можно отобразить модели *3D*-реперных объектов из Ш объектов, где *n-4* стороны «параллепипеда»: *n* – поверхность, *n* – небо и т.д. Во втором случае район делится на сегменты, при этом сегменты превышают производительность КГИ, тогда ничего не отображаем. Возьмем усредненный вариант: весь район разделим условно на десять сегментов и в каждом сегменте будет $N - 5$. Количество всех сегментов $N$ – (N×9) – ($N$ – 5). Получаем превышение. Это показывает, что необходимо применять методы исследования операций для поиска оптимального решения – определения размера квадрата сегмента первого уровня. Исследования показали, что на сегодняшний день для этого целесообразнее применять метод Гомори [18].

Для распределения примитивов в сегменте первого уровня исследованы сравнительные методы целочисленного программирования [19]. Отсутствует общий метод и алгоритм решения задач оптимального деления на сегменты. Каждый математический метод реализовывает свой алгоритм и методику. Во всех методах заключается в переходе от решения задачи целочисленного линейного программирования к решению последовательности задач линейного программирования. В решении каждой *n*-ой задачи появляется *n*-ое количество итерацией. А также возможно отсутствие допустимых решений. Чтобы этого не допустить, необходимо оптимизировать задачи в общую структуру.

Для устранение этих недостатков необходимо разработать математическую модель, которая позволяет разделить *3D*-модель района полета на сегменты первого уровня и определить размер сегмента первого уровня.

При анализе распределения ресурсов КГИ в сегменте первого уровня с учетом времени обработки возникает задача оптимизации, требующая применения методов целочисленного программирования, таких как метод Гомори (рис. 4).

Пусть имеется сегмент, *a*, который находится в зоне полета, *S.* Каждый укрупненный сегмент, в котором есть примитив высокой насыщенностью, находится на расстоянии не превышающий 30 км [20]. Время обработки примитивов происходит в режиме реального времени и не превышает 80-120 мс. Время обработки примитива кратно $\Delta t$. Время обработки для каждого примитива приведена в таблице 1.

Согласно методу Гомори, целевая функция указывает путь к поиску оптимального значения (в данном случае, оптимального времени для обработки активных примитивов первого уровня в трехмерной модели зоны), а также позволяет задать систему ограничений.

*Таблица 1 – Время для каждого примитива*

| Примитив | Время, $\Delta t$ |
|---|---|
| 3*D*-грань трех вершинная | $4\Delta t$ |
| Разделяющая плоскость | $4\Delta t$ |
| Охватывающие сферы | $2\Delta t$ |
| 3*D*-огонь обработки | $\Delta t$ |

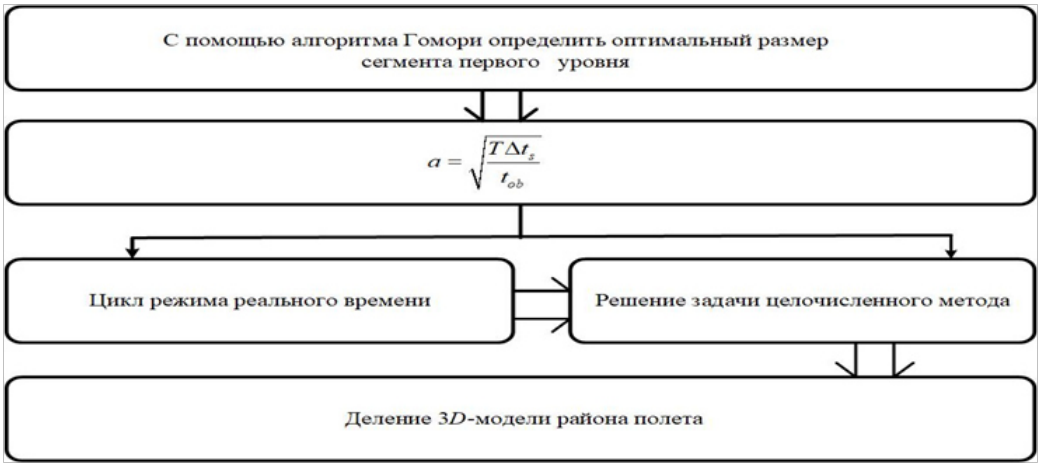



*Рисунок 4 – Применение метода Гомори для нахождения размера сегмента первого уровня*

Целевая функция выглядит так:

$$W = \sum_{j=1}^{N_a} n_a \Delta t_s \rightarrow \max, \quad (5)$$

При ограничениях:

$$\begin{cases} t_{ob} \times 780 \geq 800, \\ a \times k \geq 30, \\ t_{ob} \times \sum a + \Delta t_s \times N_a \leq 120, \end{cases} \quad (6)$$

$$S / a \geq 0, \; j = 1...n, \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^{N_a} n_a \Delta t_s = b_i, \; i = 1...n. \quad (8)$$

где:

$N_a$ – количество примитивов, которые активно обрабатываются в реальном времени;

$\Delta t_s$ – время, необходимое для обработки сегментов первого уровня;

$n_a$ – количество примитивов в режиме реального времени;

$t_{ob}$ – обобщенное время, необходимое для определения размера сегмента первого уровня;

$S$ – область *3D*-модели зона полета;

$a$ – параметры сегмента первого уровня;

$k$ – количество сегментов первого уровня;

Зная время, которое затрагивается на обработку сегмента первого уровня надо найти размер сегмента первого уровня.

$$a = \sqrt{\frac{T\Delta t_s}{t_{ob}}}, \quad (9)$$

где $T$ – обработка примитива за цикл реального времени 80-120 мс;

$\Delta t_s$ – время обработки сегмента первого уровня;

$t_{ob}$ – обобщенное время для нахождения размера сегмента первого уровня.

**Результаты.** Для решения задачи *3D*-моделирования зоны полёта заданным Заказчиком, как район размером до 1500×1500 км с целью увеличения числа учебных ситуаций, добавив к ним обучение лётчика пилотирования летательного аппарата. Решение навигационных задач с визуальным контролем *3D*-моделей реперных объектов расположенных в поворотных пунктах маршрута позволило разработать методику создания структуры базы данных компьютерного генератора изображения учитывающую распределение ресурсы компьютерного генератор изображения между сегментами первого уровня, на которые делится вся *3D*-модель зоны полёта.

Деление *3D*-модели зоны полёта на сегменты первого уровня является задачей исследования операций и имеет три предела:

– без деления *3D*-модели зоны полёта на сегменты первого уровня. Все *3D*-модели реперных объектов могут быть набраны с учётом производительности компьютерного генератора изображения, что предполагает их размещение вокруг *3D*-модели ВПП, а далее полёт приводится в условиях «сплошной облачности»;

– при делении на сегменты первого уровня. Минимальный размер, когда весь ресурс компьютерного генератора изображения отводится на перебор, «какие примитивы, размещённые в активных сегментах, должны быть обработаны при заданном положении пирамиды видимости» и на синтез *3D*-моделей реперных объектов времени не остаётся;

– при промежуточном делении *3D*-модели зоны полета на произвольно заданные размеры сегмента в 100 км, где имеется превышение возможного числа обрабатываемых сегментов.

Следовательно, указанная задача сведена к задаче исследования операций с целевой функцией и системой ограничений решений, которые легче всего проводится с помощью метода Гомори.

**Обсуждение.** Для эффективного распределения ресурсов в *3D*-модели зоны полёта необходима структура базы данных КГИ. Для нахождения оптимального решения предлагается применять метод Гомори для определения целочисленных реперных объектов.

При использовании компьютерного генератора изображений базы данных, обеспечивающей быструю замену одного сегмента первого уровня другим, количество доступных примитивов для формиро-

вания трехмерных моделей реперных объектов будет возрастать пропорционально увеличению числа сегментов.

При обработке базы данных компьютерного генератора изображений важно учитывать время, затрачиваемое на обработку самой базы данных. Это включает выбор времени для сегмента первого уровня, а также для последующих уровней, чтобы обеспечить эффективное управление ресурсами и оптимизацию процесса обработки данных.

**Выводы.** Структура базы данных задается конструкторами при делении *3D*-модели зоны полета на сегменты разного уровня. Обработка запроса на вывод нужной информации из базы данных проводится в режиме реально времени и чем проще будет структура базы данных, тем быстрее будет обрабатываться.

Деление *3D*-модели зоны полета на сегменты первого уровня с неизвестной длиной квадрата или треугольника являются размером первого уровня. Размер сегмента перового уровня определяется методом Гомори.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Роганов, В.Р. Системы моделирования трёхмерных визуально наблюдаемых моделей/ В.Р Роганов, И.Ю. Семочкина, Т.В. Жашкова // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». 2015. – Т. 1. – С. 192-195.

2. Роганов, В.Р. Моделирование внешней среды для авиационного тренажёра// Монография / М.: Изд. АйПиАрМедиа, 2022. – 125 с.

3. Кувшинова,О.А. К вопросу о семиотической составляющей видимой для лётчика модели пространства за кабиной авиационного тренажёра/, О.А. Кувшинова, В.Р Роганов, Д.М. Гринцов // В сборнике: Пром-Инжиниринг. труды VI Всероссийской научно-технической конференции. Челябинск, 2020. – С. 63-67.

4. Роганов, В.Р. Моделирование процесса синтеза *3D*-модели района полетов большого размера с помощью имитатора визуальной обстановки авиационного тренажера / В сборнике: Радиоэлектронная техника. Межвузовский сборник научных трудов. Под редакцией В.А. Сергеева. Ульяновск, 2022. – С. 208-217.

5. Roganov V. Modernisation of Endoscopic Equipment Using *3D* Indicators// V. Roganov, M. Miheev, E. Roganova, O. Grintsova, J. Lavendels, in Applied Computer Systems, May 2018. – V. 23. – № 1. – P. 75-80 doi: 10.2478/acss-2018-0010 https://www.degruyter.com/view/j/acss.

6. Roganov V.R. To issue of semiotic component visible for pilot of space model beyond cabin of aircraft simulator/ V.R Roganov, O.A. Kuvshinova, D.M. Grintsov / В сборнике: Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). Lecture notes in mechanical engineering. Chelyabinsk, 2021. – P. 420-428.

7. Roganov V., Chetvergova M., Remontova L. Features of the formation of an "Information flight model" by simulators of an aviation simulator.

8. Vyatkin S.I., Dolgovesov B.S. Combined method of visualization of functionally defined surfaces and three-dimensional textures//Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2019. – V. 55. – N. 2. – pp. 172-180.

.9. Годунов А.И., Петухов М.В., Роганов В.Р. Обработка информационных потоков в авиационных тренажерах// Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем: процессы, модели, эксперимент. 1997. – № 2. – С. 37.

10. Роганов В.Р., Роганова Э.В., Игонин О.О. Построение подстилающих поверхностей для размещения моделей реальных объектов в моделях реальной местности при фиксированных точках расположения наблюдателя // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2008. – № 1-2 (11). – С.119-126.

11. Пылов П.А., Протодьяконов А.В. Deviation in the Big Data and its visualization // Инновации. Наука. Образование. – 2021. – № 30. – С. 712-717.

12. Roganov V.R. The task of increasing the number of training situations as one of the areas for improving the ergatic software and hardware systems “Aviation simulator”//V.R. Roganov, E.A. Asmolova, N.S. Esimova, R.U. Omirbekov, O. Kuvshinova and G.K. Aidarbek in International Conference Aviation Engineering and Transportation (AviaEnT 2020). IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1061 (2021) 012014, pp.1-9. IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/1061/1/012014.

13. Vyatkin S.I., Dolgovesov B.S. Compression of geometric data with the use of perturbation functions//Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2018. – V. 54. – N. 4. – P. 1.

14. Пролетарский, А.В. Методы ситуационного анализа и графической визуализации потоков больших данных / А.В. Пролетарский, Д.В. Березкин, Ю.Е. Гапанюк, И.А. Козлов [и др.].//Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2018. – № 2. – С. 98-123.

15 Роганов, В.Р. Организация визуальных баз данных и управление компьютерными генераторами изображений имитаторов визуальной обстановки тренажеров: Специальность 05.13.01 – "Управление в технических системах: Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Роганов Владимир Робертович; Пензенский государственный университет. – Пенза,1995. – 17 с.

16. Роганов, В.Р. Анализ современного состояния исследований и разработок визуальных баз данных компьютерных генераторов изображений имитаторов визуальной обстановки авиационных тренажёров/ В.Р. Роганов//Современные информационные технологии. – 2017. – № 26. – С. 45-57.

17. Vyatkin S.I., Dolgovesov B.S. Compression of geometric data with the use of perturbation functions//Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2018. – V. 54. – N. 4. – P. 1.

18. Гурин, Л.С. Задачи и методы оптимального распределения ресурсов/ Л.С. Гурин, Я.С. Дымарский, А.Д. Меркулов. –Москва: «Советское радио», 1968. – 479 с.

19. Черчмен У. Введение в исследование операций/ У. Черчмен, Р. Акоф, Л. Арноф. Перевод с английского. Издательство «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, М., 1967. – С. 488.

20 Марчук, В.И. Задачи моделирования района полетов для авиационных тренажеров и операторов беспилотных летательных аппаратов / В.И. Марчук, Т.А. Глебова, О.А. Кувшинова, Н. Есимова // Надежность и качество сложных систем. – 2021. – №3(35). – С. 80-86.

*Статья поступила в редакцию 24.04.2024*
*Статья принята к публикации 17.06.2024*

УДК 536.21
EDN: VKDHDW

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРОВ КОНТАКТНОЙ ПЛОЩАДКИ НА ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ

© Авторы 2024
SPIN:1142-5010
AuthorID: 1111528

**ВЕРШИНИН Егор Андреевич,** аспирант
*Пензенский государственный университет*
*(440026, Россия, Пенза, улица Красная, 40 корпус 3, e-mail: egor.verschinin2011@yandex.ru)*
SPIN: 9986-0973
AuthorID: 614496
ORCID: 0000-0002-2071-5404
ResearcherID: B-5784-2016
ScopusID: 7005080984

**МИХЕЕВ Михаил Юрьевич**, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Информационные технологии и системы»
*Пензенский государственный технологический университет*
*(440026, Россия, Пенза, пр.Байдукова / ул. Гагарина, д.1а / 11, e-mail: mix1959@gmail.com)*
SPIN: 5534-3029
AuthorID: 826498
ORCID: 0000-0002-3008-5821
ResearcherID: T-9857-2017
ScopusID: 57193611740

**РЫБАКОВ Илья Михайлович**, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Конструирование и производство радиоаппаратуры»
*Пензенский государственный университет*
*(440026, Россия, Пенза, улица Красная, 40 корпус 3, e-mail: rybakov_im@mail.ru*

**Аннотация.** Представленный анализ направлен на изучение и влияние габаритов контактной площадки в контексте лучшего отвода тепла. Отведение тепла является важнейшим и главным аспектом в разработке и модернизации электронных устройств, поскольку отвод тепла сказывается на надежность, стойкость и производительность аппаратуры к различным внешним воздействующим факторам. Методика исследование включает в себя численное моделирование через программный пакет *ANSYS* модуль *Icepak* для расчета тепловых режимов в зависимости от габаритов контактной площадки. Результаты проведенного математического моделирования и аналитического расчета в данном программном пакете с несколькими типами размерами контактной площадки. Полученные результаты расчета теплового режима покажут наиболее оптимальный конфигурацию для улучшения эффективности теплообмена и как ее оптимизировать в различной радиоэлектронной аппаратуре.

**Ключевые слова:** тепло, контактная площадка, радиоэлектронная аппаратура, мощность, температура, габариты, *ANSYS*, результаты, численное моделирование, *Icepak*.

# RESEARCH OF THE INFLUENCE OF THE CONTACT PAD DIMENSIONS ON THERMAL CONDITIONS

© The Autors 2024
**VERSHININ Egor Andreevich,** graduate student
*Penza State University*
*(440026, Russia, Penza, Krasnaya st., 40, e-mail: egor.verschinin2011@yandex.ru*)
**MIKHEEV Mikhail Yurievich,** doctor of technical sciences, professor,
head of the Department «Information technologies and systems»
*Penza State Technological University*
*440026, Russia, Penza, Baydukova / Gagarina st., 1a / 11, e-mail: mix1959@gmail.com*
**RYBAKOV Il'ya Michailovich,** candidate technical science,
associate professor of the Department «Design and Production of Radio Equipment»
*Penza State University*
*(440026, Russia, Penza, Krasnaya st., 40, e-mail: rybakov_im@mail.ru*)

**Abstract.** The presented analysis aims to study and influence the dimensions of the contact pad in the context of better heat dissipation. Heat dissipation is a crucial and major aspect in the design and modernization of electronic devices, since heat dissipation affects the reliability, resistance and performance of the hardware to various external influencing factors. The research methodology includes numerical modeling through the ANSYS software package Icepak module to calculate thermal modes depending on the dimensions of the contact area. The results of the conducted mathematical

modeling and analytical calculation in this software package with several types of contact pad dimensions. The obtained results of thermal mode calculation will show the most optimal configuration to improve the efficiency of heat exchange and how to optimize it in various radio-electronic equipment.

**Keywords:** heat, contact pad, electronic equipment, power, temperature, dimensions, *ANSYS*, results, numerical modeling, *Icepak*.

***Для цитирования:*** *Вершинин Е.А. Исследование влияния размеров контактной площадки на тепловые режимы / Е.А. Вершинин, М.Ю. Михеев, И.М. Рыбаков // XXI век:итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 2(66). – С. 55-59. – EDN: VKDHDW.*

**Введение.** В современном мире инженерных технологий с увеличением степени интеграции радиоэлектронной аппаратуры все более и более становится популярным исследования печатных плат на различные характеристики: механические воздействия, температурные и использования программных пакетов для реализации расчетов [10, 11]. Поскольку надежность элементов радиоэлектронной аппаратуры существенным образом зависит от температуры окружающей среды, необходимо использование теплоотводов, в качестве которых удобно использовать соответствующие контактные площадки, при этом необходимо организовать соответствующий и термоинтерфейс. В технических условиях на эксплуатацию каждого типа элемента радиоэлектронной аппаратуры задается предельная температура эксплуатации. Несмотря на распространенное применение, вопрос различных габаритных размеры контактных площадок остается открытым на сегодняшний день и требует дальнейшего и более глубокого изучения.

Для инженеров размеры контактных площадок имеют огромное значение: при каких дальнейших оптимальных параметрах возможен наиболее минимальный перегрев радиоэлектронного средства и как повысить эффективность теплообмена [6]. Все эти требования могут привести к созданию унифицированного решения для эффективности, для минимизации экономических затрат.

Стандарт *IPC-7351B* определяет размеры контактных площадок для поверхностно-монтируемых и штырьковых компонентов, при этом выделяются три уровня плотности монтажа: *A, B* и *C*. Наиболее низкой плотности монтажа соответствует уровень *A*, соответственно уровень *B* соответствует средней, а *C* высокой плотности монтажа. Стандарт устанавливает максимальный выступ контактных площадок за пределы вывода для уровня *A* и минимальный для уровня *C*. Это обеспечивает соответствие требованиям различных плотностей монтажа в зависимости от конкретных проектных требований. Компания *Mentor Graphics* предоставляет программу *LP Calculator*, входящую в комплект стандарта *IPC-7351B*. Эта программа облегчает процесс проектирования, открывая доступ к библиотеке посадочных мест соответствующих компонентов. *LP Calculator* также обеспечивает возможность расчетов размеров контактных площадок, в соответствии с требованиями стандарта *IPC-7351B*. Вводя исходные данные о типе и размерах корпуса компонента, инженер может получить оптимальные размеры контактных площадок. Такое решение обеспечивает соответствие стандартам, и соответственно повышает эффективность процесса проектирования, сокращая при этом время проектирования контактных площадок для соответствующих радиотехнических компонентов. Благодаря возможности рассчитывать размеры контактных площадок в соответствии с требованиями *IPC-7351B*, инженеры могут легко адаптировать конструкцию печатной платы под конкретные условия эксплуатации и требования проекта. Стандартные уровни плотности монтажа в *IPC-7351B* обеспечивают гибкость в выборе размеров контактных площадок в зависимости от конкретных потребностей конструкции. Программа *LP Calculator* предоставляет удобные инструменты для просмотра и анализа библиотек посадочных мест, делая процесс выбора и оптимизации контактных площадок более прозрачным. Система уровней плотности монтажа в *IPC-7351B* также обеспечивает стандартизацию, что содействует совместимости и обмену компонентами между различными производителями и проектами. Использование программы *LP Calculator* в сочетании со стандартом *IPC-7351B* предоставляет инженерам возможность быстро и точно рассчитывать размеры контактных площадок для оптимальной производительности. Благодаря системе уровней плотности монтажа и соответствующему программному обеспечению, инженеры могут точно подстроить размеры контактных площадок в соответствии с уровнем требуемой плотности монтажа. Программа *LP Calculator* дает инженерам возможность эффективно управлять библиотеками посадочных мест, что обеспечивает легкий доступ к информации о контактных площадках для различных компонентов. Объединение стандарта *IPC-7351B* и программы *LP Calculator* обеспечивает не только соответствие требованиям, но и создает инструменты для оптимизации и инноваций в процессе проектирования печатных плат.

Изучение эффектов изменения размеров площадки контактной представляет собой перспективу в дальнейшем современном будущем в области теплового режима. Это открывает горизонты нового времени для разработки материалов и технологий. Понимание этих фундаментальных принципов поможет создать более уточненную модель теплообмена и разработать новые материалы, что откроет принципиально новые возможности по улучшению условий работы конструкторов радиоэлектронной аппаратуры и разработке новых технических решений в области

эффективных систем охлаждения радиоэлектронной аппаратуры.

Изложенные в данной работе результаты работы направленные на оптимизацию габаритов контактных площадок посредством расчета тепловых режимов. Соответствующее направление научных исследований представляется актуальным и перспективным, имеющим важное значение для разработки новых технических решений в области конструирования и производства радиоэлектронной аппаратуры.

**Методология.** Была проведена работа из серии нескольких экспериментов, используя различные габариты контактной площадки для влияния габаритов контактной площадки на передачи ее тепла с одинаковыми условиями эксплуатации: одинаковая повышенная рабочая температура среды и атмосферное давлении. Результаты моделирования анализировались с целью выбора размеров контактных площадок на тепловые режимы и эффективность теплоотдачи. Полученные результаты экспериментов математического моделирования использованы для формулировки выводов, рекомендаций по оптимизации размеров контактных площадок с точки зрения тепловых характеристик.

**Результаты.** Данные о типах размеров контактной площадки показывают [2], что при изменении габаритов контактных площадок существенно влияют результаты расчета тепловых режимов данного печатного узла. При увеличении габаритов улучшается сама эффективность теплообмена [4-6], но исходя из результатов, были выделены оптимальные габариты, при котором достигается максимальная эффективность. В программный модуль *Icepak* пакета *ANSYS* были загружены следующие исходные параметры: тепловые сопротивления микросхем, потребляемая (рассеиваемая) мощность, теплопроводность, плотность монтажа, а также габаритные размеры контактной площадки. Результаты расчета тепловых режимов представлены в таблице 1.

Далее на рисунке 1 представлено изменение температуры с различными габаритами контактных площадок.

*Таблица 1 – Результаты расчета тепловых режимов печатного узла*

| Размеры контактной площадки | Наименование | Потребляемая (рассеиваемая) мощность, Вт. | Результаты расчета температуры воздуха (корпуса), кристалла*,° | Допустимая по НТД температура воздуха (корпуса) кристалла*, ° |
|---|---|---|---|---|
| Без использования контактной площадки | Плата печатная | 4,0 | 53,5 | 80 |
| | RK3568J | 2,5 | 75,4 (86,2) 92,3* | 80 125* |
| Контактная площадка 10x10 | Плата печатная | 4,0 | 52,1 | 80 |
| | RK3568J | 2,5 | 74,0 (84,7) 90,9* | 80 125* |
| Контактная площадка 19x19 | Плата печатная | 4,0 | 50,1 | 80 |
| | RK3568J | 2,5 | 72,0 (82,7) 88,9* | 80 125* |
| Контактная площадка 25x25 | Плата печатная | 4,0 | 49,4 | 80 |
| | RK3568J | 2,5 | 75,4 (86,2) 92,3* | 80 125* |
| Примечания:<br>1 Для печатной платы из стеклотекстолита допустимая температура 105° | | | | |

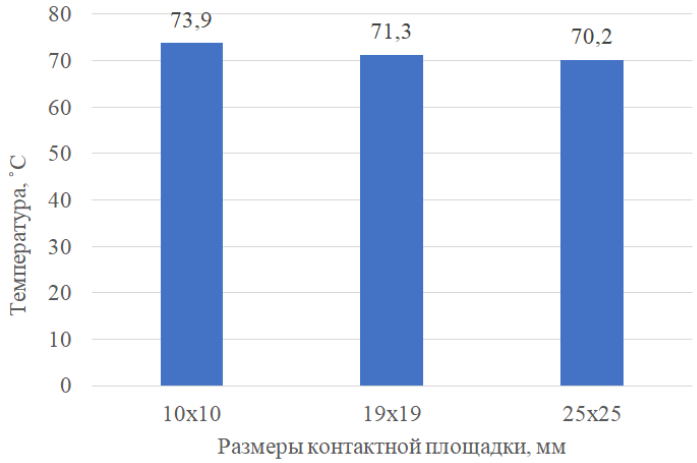



*Рисунок 1 – Температуры контактных площадок с различными габаритами*

**Обсуждение.** Различные габариты контактной площадки [3] могут улучшить тепловой режим различных электрорадиоэлементов и аппаратуры в целом: чем больше габариты контактной площадки, тем лучше будет протекать тепловой обмен и тем надежней и устойчивей будет аппаратура [7]. Данный диапазон значений, представленных в таблице 1 и на рисунке 1, при которых была рассчитана эффек-

тивная передачи тепла, становится максимальна, и предполагается техническое применение на основе сравнительного анализа. Результаты таблицы 1 показывают, что без использования контактной площадки и с использованием контактной площадки 10х10 мм., 19х19 мм., 25х25 мм. отличается на 1,4°С, 3,4°С и 4,4°С, соответственно. Температура нагрева контактных площадок размером 10х10 мм., 19х19 мм., 25х25 мм. можетдостигать значения: 79,3°С 73,1°С и 70,2°С, соответственно, что иллюстрируется на рисунка 1.

Проведенное моделирования с применением численных методов позволило оценить влияние размеров контактной площадки на тепловые характеристики. Такое решение позволяет уже на этапе проектирования обосновывать практически важные конструктивные решения по оптимизации подсистем охлаждения.

В рассматриваемом случае решения относительно размеров контактной площадки оказывает существенное влияние на тепловой режим соответствующих конструктивных вариантов электронных устройств. Использованный подход позволяет повысить надежности и безопасность работы соответствующих узлов и радиоэлектронных компонент. Тем самым этап численного моделирования стал важным этапом проектирования радиоэлектронной аппаратуры, а его интеграция в процесс сквозного проектирования обеспечивает существенное сокращение времени проектирования и затрат на изготовление и тестирование макетных или опытных образцов. В рассматриваемом случае варьированием габаритными размерами контактных площадок удается обеспечить технические требования и обеспечить адаптацию проектируемых устройств к заданным условиям эксплуатации.

В более общем случае метод численного моделирования тепловых полей предполагает разработку и внедрение более эффективных и инновационных решений в области теплоотводящих систем. В качестве программного обеспечения целесообразно использовать в частности пакет *ANSYS Icepak*, обеспечивающий моделирование и сравнительный анализ тепловых режимов в зависимости от конструктивных особенностей и условий эксплуатации соответствующих изделий. Таким образом, показана возможность прогноза для соответствующих режимов работы разрабатываемых вариантов конструкций для разных условий эксплуатации. Причем соответствующий результат получается уже на этапе проектирования, обеспечивая решение вопросов оценки их технических характеристик и возможные варианты оптимизации.

Естественно результаты численного моделирования необходимо согласовывать с данными натурных испытаний, такое решение целесообразно использовать при модернизации ранее разработанных изделий, а также использовать накопленный опыт при разработке новых поколений устройств соответствующего назначения. В данной работе акцент сделан на варьировании габаритных размеров контактных площадок и показана эффективность такого подхода при оптимизации тепловых режимов радиоэлектронных устройств с учетом условий эксплуатации. Оптимизация процедуры проектирования очевидно будет способствовать повышению технических характеристик проектируемых изделий и соответственно их конкурентоспособности.

**Выводы.** Таким образом, приведенные результаты исследований показали, что варьированием габаритных размеров контактных площадок удается оптимизировать тепловой режим радиоэлектронной аппаратуры.

Использованный подход, базирующийся на применении методов численного моделирования обеспечивает уже на этапе проектирования спрогнозировать тепловые режимы работы радиоэлектронной аппаратуры для заданных вариантов условий эксплуатации.

В качестве вариативного параметра используемого при оптимизации теплового режима использованы габаритные размеры контактных площадок, что подтверждено в процессе моделирования. Показано, что габаритные размеры контактных площадок оказывают существенное влияние на тепловой режим проектируемой радиоаппаратуры.

Представленные в работе результаты подтверждают важность полученных технических решений для построения систем эффективного теплового обмена и предложены варианты решений, получаемых посредством оптимизации габаритных размеров контактных площадок. Внедрение полученных результатов, полученных в результате моделирования, уточненных посредством натурных экспериментов, позволят повысить эффективность работы, а также стойкость и надежность работы радиоэлектронной аппаратуры в заданных условиях эксплуатации.

Использование численного моделирования, с применением соответствующих математических тепловых полей обеспечивают прогнозирование варианты работы в соответствующих условиях эксплуатации и предвидеть возможные проблемы уже на этапе проектирования. Тем самым вырабатывать соответствующие рекомендации и технические требования.

В процессе проектирования использованы программные средства учитывающие в процессе моделирования большую совокупность технических параметров проектируемого изделия, а именно поверхностные и граничные условия, требования к теплопередаче отдельных конструктивных материалов, а также соответствующие технические и конструктивные требования к отдельным элементам и узлам.

Показано что оптимизация габаритных размеров контактных площадок оказывается удобным вариативным параметром, обеспечивающим оптимизацию систем теплообмена для изделий радиоэлектронной аппаратуры, применяемых в различных отраслях народного хозяйства, обеспечивая снижение энергетических затрат, повышению стойкости и надежности стойкости радиоаппаратуры различного назначения.

Полученные результаты могут быть использованы в соответствующих областях науки и техники для оп-

тимизации и теплообмена.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Проектирование датчика температуры методом имитационного моделирования / В.Н. Пономарев, А.А. Трофимов, Д.В. Дерябин [и др.] // Надежность и качество сложных систем. – 2023. – № 3(43). – С. 55-61. – DOI 10.21685/2307-4205-2023-3-7. – EDN: FYJHHL.

2. Аброськин Н.С., Данилова Е.А., Жумашев Н.Г. Анализ современных средств тепловизионного исследования / Современные информационные технологии. – 2017. – № 2. – С. 639-645.

3. Анализ эффективности термоинтерфейса и контактной площадки в отводе тепла: сравнительное исследование / Е.А. Вершинин, С.Д. Кузнецов [и др.] // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». – 2023. – Т. 2. – С. 72-74. – EDN: PTRXQK.

4. Борщев, Н.О. Параметрическая идентификация падающего теплового потока как функция от времени и координаты методом итерационной регуляризации / Н.О. Борщев // Надежность и качество сложных систем. – 2022. – № 4(40). – С. 15-23. – DOI: 10.21685/2307-4205-2022-4-2. – EDN: BWRUVB.

5. Grishko, A.K. Anisotropic model of the system for monitoring and controlling the thermal parameters of board radio modules / A.K. Grishko // Reliability & Quality of Complex Systems. – 2022. – N. 2(38). – P. 25-32. – DOI: 10.21685/2307-4205-2022-2-3. – EDN: RQMOQO.

6. Басов К.А. ANSYS и LMSVirtualLab. Геометрическое моделирование. М.: ДМК Пресс, 2006. – С. 240.

7. N.K. Yurkov, I.I. Kochegarov, A.K. Grishko and I.M. Rybakov, «Problems of Equipment Control in Automatic Information-measuring Control Systems», 2023 5th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, Russian Federation, 2023, pp. 535-541, doi: 10.1109/SUMMA60232.2023.10349550.

8. Горячев Н.В. Исследование тепловых режимов радиоэлектронных средств / Н.В. Горячев, А.В. Лысенко, Д.Л. Петрянин, И.Д. Граб, П.Г. Андреев // Ульяновский центр трансфера технологий: Сборник аннотаций проектов Молодёжного инновационного форума Приволжского федерального округа. – Ульяновск: УлГТУ. – 2009. – С. 96-98.

9. Юндин, А.С. Способы отвода тепла от электронных компонентов печатных плат / А.С. Юндин // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей победителей V Международной научно-практической конференции: в 4 частях, Пенза. Часть 4. – Пенза: «Наука и Просвещение», 2017. – С. 129-136. – EDN: YNQSZX.

10. Статистическое определение основных показателей надежности технической системы и её элементов / А.И. Годунов, В.В. Баранов, Ю.Н. Борщин, А.А. Куторов // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2023. – Т. 1. – С. 13-18. – EDN: FEPLLF.

11. Дивеев, А.И. Полное решение задачи оптимального управления / А.И. Дивеев, Е.Ю. Шмалько, А.В. Барабаш // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2023. – Т. 1. – С. 96-102. – EDN: ZZYIUC.

12. Перевертов, В.П. Нанотехнологии и качество деталей транспортного машиностроения / В.П. Перевертов, Н.К. Юрков, Ю.А. Романенко // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2022. – Т. 1. – С. 39-42. – EDN: DLVRIY.

13. Абрамов, О.В. Оптимальное проектирование аналоговых технических систем по критерию запаса работоспособности / О.В. Абрамов // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2021. – Т. 1. – С. 29-32. – EDN: TQYDTU.

14. Masloboev, A.V. Systematic approach for ensuring the resilience of ecological-economic systems of the Russian Arctic (part 2. Assessment procedure and criteria) / A.V. Masloboev // Reliability & Quality of Complex Systems. – 2023. – No. 2(42). – P. 115-126. – DOI: 10.21685/2307-4205-2023-2-13. – EDN: WCJVKY.

15. Putilov, V.A. State-of-the-art of the management information infrastructure of Arctic region development: challenges, trends and limitations / V.A. Putilov, A.V. Masloboev // Reliability & Quality of Complex Systems. – 2021. – No. 2(34). – P. 24-35. – DOI: 10.21685/2307-4205-2021-2-3. – EDN: ABYTWS.

16. Чернавин, П.Ф. Управление качеством решающего правила и минимизация числа признаков в задачах классификации на основе моделей математического программирования / П.Ф. Чернавин, Н.П. Чернавин, Ф.П. Чернавин // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2023. – № 1(61). – С. 112-119. – DOI: 10.54398/20741707_2023_1_112. – EDN: JPWZIG.

17. Смирнова, Ю.А. Разработка алгоритма и метода трансформации записи атомно-молекулярных систем / Ю.А. Смирнова, Л.И. Головацкая // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2022. – № 2(58). – С. 61-67. – EDN: PDIWVT.

18. Времяимпульсные преобразователи в автономных информационных и измерительных системах / А.В. Захаров, И.В. Либкинд, В.Ю. Трофимов, Л.Е. Шахмейстер // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2023. – № 2(44). – С. 59-69. – DOI: 10.21685/2307-5538-2023-2-7. – EDN: ZTULZG.

19. Подтверждение соответствия программных средств испытаний военной техники метрологическим требованиям. Состояние, перспективы развития / И.В. Чащин, О.А. Ширямов, А.В. Колосова, А.В. Протасова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2022. – № 1(39). – С. 47-55. – DOI: 10.21685/2307-5538-2022-1-6. – EDN: NFHQYS.

20. Буракова, Е.А. Концепция управления сложными технологическими системами производства углеродных наноматериалов / Е.А. Буракова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2023. – № 1(61). – С. 9-18. – DOI: 10.54398/20741707_2023_1_9. – EDN: UFDNOM.

*Статья поступила в редакцию 15.04.2024*
*Статья принята к публикации 17.06.2024*

УДК 004.514
EDN: OMWGQC

# РАЗРАБОТКА ВЕБ-СЕРВИСА ПРОВЕРКИ АКТУАЛЬНОСТИ И ДОСТУПНОСТИ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

© Авторы 2024

SPIN: 7309-8280
AuthorID: 615475
ORCID: 0000-0002-3292-7260

**ГУДКОВ Кирилл Владимирович**, кандидат технических наук,
доцент кафедры«Информационные технологии и системы»
*Пензенский государственный технологический университет*
*(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/улица Гагарина, д. 1а/11, e-mail: gudkovk.pgta@gmail.com)*
ORCID: 0009-0009-2650-3718

**ШИРИКОВ Роман Сергеевич,** студент кафедры «Информационные технологии и системы»
*Пензенский государственный технологический университет*
*(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/улица Гагарина, д. 1а/11, e-mail: romychan333@gmail.com)*

**Аннотация.** Работа посвящена разработке веб-сервиса проверки актуальности и доступности литературных источников. Реализация данного программного проекта представляет актуальное прикладное направление, поскольку позволила автоматизировать процесс контроля библиографии учебных документов. В качестве метода документирования требований выбран объектно-ориентированный подход с использованием средств языка *UML* с реализацией в инструменте визуального моделирования *PlantUML*. Для проектирования элементов дизайна использовался графический редактор *Figma*. Технологический стек для разработки, основан на языке разметки HTML, каскадном табличном стиле *CSS*, языке программирования *JavaScript* и библиотеках *React* и *ReactQuery*. В статье представлены полученные результаты реализации программного проекта по разработке проверки актуальности и доступности литературных источников в виде функциональной *UML*-диаграммы прецедентов и поведенческих *UML*-диаграмм деятельности, состояния и последовательности. Также выполнено проектирование дизайна пользовательского интерфейса и элементов веб-сервиса. Реализован интерфейс и логика работы веб-сервиса на основе выбранного технологического стека. На последнем этапе выполнено тестирование и отладка. Реализация этих этапов позволили создать программный продукт, отвечающий стандартам качества и ожиданиям конечных пользователей. Созданный веб-сервис обеспечивает эффективное выполнение задач проверки актуальности и доступности литературных источников, а также обладает удобным интерфейсом и интуитивно понятным функционалом.

**Ключевые слова:** автоматизация информационных систем, анализ требований, веб-сервис, пользовательский интерфейс, *UX*, система электронного документооборота, *UML*, *JavaScript*, *CSS*, тестирование.

# DEVELOPMENT OF A WEB SERVICE FOR CHECKING THE RELEVANCE AND AVAILABILITY OF LITERARY SOURCES

© Авторы 2024

**GUDKOV Kirill Vladimirovich**, candidate of technical sciences,
associate professor of the Department of Information Technologies and Systems
*Penza State Technological University*
*(440039, Russia, Penza, Baidukova proezd/Gagarin Street, 1a/11, e-mail: gudkovk.pgta@gmail.com)*
**SHIRIKOV Roman Sergeevich**, student of the Department of Information Technologies and Systems
*Penza State Technological University*
*(440039, Russia, Penza, Baidukova proezd/Gagarin Street, 1a/11, e-mail: romychan333@gmail.com)*

**Abstract.** The work is devoted to the development of a web service for checking the relevance and accessibility of literary sources. The implementation of this software project represents a current applied direction, since it made it possible to automate the process of monitoring the bibliography of educational documents. An object-oriented approach using *UML* language tools with implementation in the *PlantUML* visual modeling tool was chosen as a method for documenting requirements. The *Figma* graphic editor was used to design the design elements. Development technology stack based on *HTML* markup language, *CSS* cascading table style, *JavaScript* programming language, and *React* and *ReactQuery* libraries. The article presents the results obtained from implementing a software project to develop a check for the relevance and accessibility of literary sources in the form of a functional *UML* diagram of precedents and behavioral *UML* diagrams of activity, state and sequence. We also designed the user interface design and web service elements. The interface and operating logic of the web service are implemented based on the selected technology stack. The last stage involves testing and debugging. The implementation of these stages allowed us to create a software product that meets quality standards and the expectations of end users. The created web service ensures the effective execution of tasks of checking the relevance and accessibility of literary sources, and also has a user-friendly interface and intuitive functionality.

**Keywords:** automation of information systems, requirements analysis, web service, user interface, UX, electronic document management system*, UML, JavaScript, CSS, testing.*

***Для цитирования**. Гудков К.В. Разработка веб-сервиса проверки актуальности и доступности литературных источников/ К.В. Гудков, Р.С. Шириков // XXI век:итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 2(66). – С. 60-68. – EDN: OMWGQC.*

**Введение.** Система электронного документооборота (СЭД) – программное обеспечение, позволяющее организовать работу с электронными документами: их создание, изменение и поиск, а также взаимодействие между сотрудниками, передачу, согласование, ознакомление и т.д. Современные СЭД обладают широкой функциональностью, которая применяется для автоматизации документооборота, делопроизводства, управления бизнес-процессами и контроля исполнительской дисциплины в организациях [1]. СЭД играют важную ролью в современном образовательном процессе. Они позволяют упростить работу с документами, сократить время на их обработку и повысить эффективность деятельности образовательных учреждений [2-5].

Одним из важных элементов данных систем в сфере образования является поддержание актуальности списка литературных источников в учебных документах. Согласно федеральному государственному образовательному стандарту, вся учебная литература должна быть доступна для студентов в процессе обучения [6]. Однако поддержание этого списка в актуальном состоянии часто требует значительных усилий и временных трудозатрат. По этим причинам создание веб-сервиса для осуществления проверки актуальности и доступности литературных источников, способного автоматизировать процесс контроля библиографии учебных документов, представляет собой актуальное прикладное направление. Цель данной статьи состоит в реализации программного проекта по разработке веб-сервиса для осуществления проверки актуальности и доступности литературных источников. Для этого в работе поставлены и решены задачи анализа и документирования требований, проектирования, кодирования, тестирования, что составляет основные этапы жизненного цикла программного проекта [7,8] программного продукта.

**Методология.** Разработка программного проекта требует применения современных методов проектирования программного обеспечения. Для пошагового и итеративного подхода к созданию функциональности использована *Agile*-методология разработки программных продуктов, в частности методика *Scrum* [9]. В качестве метода документирования требований [10,11] к разрабатываемому веб-сервису выбран объектно-ориентированный подход с использованием средств языка *Unified Modeling Language* (*UML*). В контексте моделируемой предметной области *UML* использован для создания графических представлений и спецификаций. Разработанные диаграммы прецедентов, деятельности, состояний, активности созданы с использованием инструмента визуального моделирования *PlantUML*.

При проектировании элементов дизайна веб-сервиса для осуществления проверки актуальности и доступности литературы использовался графический редактор *Figma*. В этом процессе особое внимание уделено внешнему виду и стилю элементов.

Выбор правильного технологического стека для разработки является важным этапом жизненного цикла проекта. Для разработки веб-сервиса использовались современные и актуальные технологии. Среди них язык разметки *HTML* и каскадный табличный стиль *CSS*. В качестве препроцессора *CSS* был выбран *SASS*, а для создания интерактивности использовался язык программирования *JavaScript*. Для работы с *JavaScript* была выбрана библиотека *React* [12].

*HTML* (*Hypertext Markup Language*) – это именно язык разметки, а не программирования, он применен для идентификации и описания различных компонентов документа, таких как заголовки, абзацы и списки. Разметка определяет базовую структуру документа – детализированную машиночитаемую схему.

*CSS* (каскадные таблицы стилей) отвечает за описание внешнего вида *HTML*-документа, управляет шрифтами, цветами, фоновыми изображениями, межстрочным интервалом, макетом страницы и т.п.

*SASS* (*Syntactically Awesome Stylesheets*) – препроцессор *CSS*, расширяющий возможности стандартного *CSS*. Основными его преимуществами является наличие миксинов, переменных и вложенных правил. Миксины – функция, которая принимает параметры и возвращает блок кода *SCSS*. Они позволяют создавать повторно используемые блоки стилей, не дублируя код. Переменные позволяют определять значения, которые затем повторно использованы в коде. Вложенные правила используются для группировки связанных стилей внутри блоков. Наличие данных преимуществ повышает скорость разработки и уменьшает количество дублирования кода, что ведет к повышению его качества и читаемости.

*JavaScript* – высокоуровневый, динамический, интерпретируемый язык программирования вебсетидля объектно-ориентированного и функционального стилей программирования. Подавляющее большинство веб-сайтов использует *JavaScript*, а все современные веб-браузеры – в настольных компьютерах, планшетах и смартфонах – включают интерпретаторы *JavaScript*, делая его самым расп-

ространенным языком программирования. Для разработки интерфейса использовалась *JavaScript*-библиотека *React*, обеспечивающая вывод на экран содержимого веб-страниц.

Для работы с сервером в приложении была использована библиотека *ReactQuery*, выполняющая выборку данных. Это позволяет упрощать кэширование, синхронизацию и обновление состояния сервера.

**Результаты.** *Анализ и документирование требований.* Результатом анализа и документирования требований выступают *UML* диаграммы. Разработанная диаграмма прецедентов веб-сервиса (рис. 1) использована для определения требований и моделирования процессов, связанных с проверкой литературных источников. Основные элементы этой диаграммы представляют: актеры – сущности, использующие веб-сервис для проверки литературных источников; варианты использования – сценарии, описывающие действия пользователя и сервера по поиску, проверке доступности и актуальности литературных источников, а также реакцию системы на эти действия. Диаграмма визуализировала функциональные требования, процесс взаимодействия пользователя с системой и ожидаемый результат.

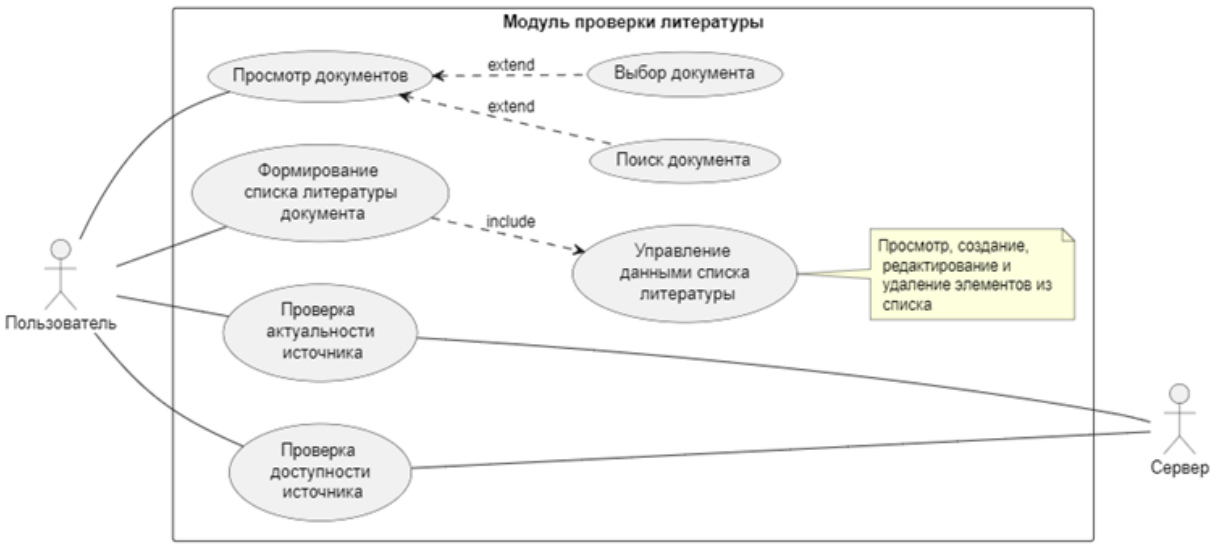



*Рисунок 1 – Диаграмма прецедентов для веб-сервиса проверки актуальности и доступности литературных источников*

В рамках предметной области было выделено два основных актера: пользователь и сервер. Пользователь – это человек, который работает со списком литературных источников и взаимодействует с системой. Сервер – это сервис для хранения и обработки данных о литературных источниках, который отвечает на запросы пользователя и предоставляет ему необходимую информацию.

Вариант использования «Проверка актуальности источника» подразумевает отправку запроса на сервер для подтверждения, что указанный литературный источник актуален на данный момент. Проверка актуальности литературного источника проводится по критерию сравнения года выпуска источника с допустимыми. Для основной литературы срок использования источника составляет не более пяти лет, для дополнительной литературы не более 10 лет. Вариант использования «Проверка доступности источника» включает проверку того, можно ли получить доступ к указанному информационному ресурсу путем отправки запроса на сервер. Таким образом, критерием проверки доступности литературного источника выступает возможность обращения к электронной библиотеке по имеющейся на литературный источник ссылке Вариант использования «просмотр документов» расширяется двумя вариантами использования: «Поиск» и «Выбор документа». В первом варианте пользователь вводит ключевые слова для поиска подходящего документа. Во втором варианте пользователь выбирает документ на основе которого будет осуществляться изменение списка литературных источников. Вариант использования «Формирование списка литературных источников в документе» включает в себя вариант «Управление данными списка литературных источников», который предполагает просмотр, создание, редактирование и удаление элементов списка, реализуя основные *CRUDL*-операции программного продукта.

Разработанная диаграмма деятельности отображает последовательность действий в виде алгоритма для процесса проверки литературного источника. Она показывает поток управления и поток объектов в проектируемом веб-сервисе (рис. 2).

Взаимодействие пользователя с веб-сервисом проверки литературных источников начинается с поиска и выбора необходимого документа для добавления источника. Далее пользователь заполняет

необходимые поля: библиографическую запись и тип литературного источника. После подтверждения сервер начинает поиск библиографической записи в базе данных. Если такая запись уже существует, то пользователю сразу выводится статус данной записи. В противном случае сервер начинает проверку доступности и актуальности источника. Как только все проверки завершены, создается новый объект – литературный источник. В конце запись об этом источнике сохраняется в базе данных и взаимодействие заканчивается.

Далее для проектируемого веб-сервиса создана диаграмма состояний объекта «Литературный источник», показывающая его жизненный цикл в виде всех возможных состояний, переходов триггеров, являющихся инициаторами переходов и сопоставляющихся с внешними событиями. Также состояния характеризуются внутренними действиями: вход (*entry*) – действие, осуществляемое при переходе в данное состояние; внутренняя активность (*do*) – выполнение объектом определенных операций или процедур, требующих некоторого времени; выход (*exit*) – действие, выполняемое при выходе из этого состояния (рис. 3).

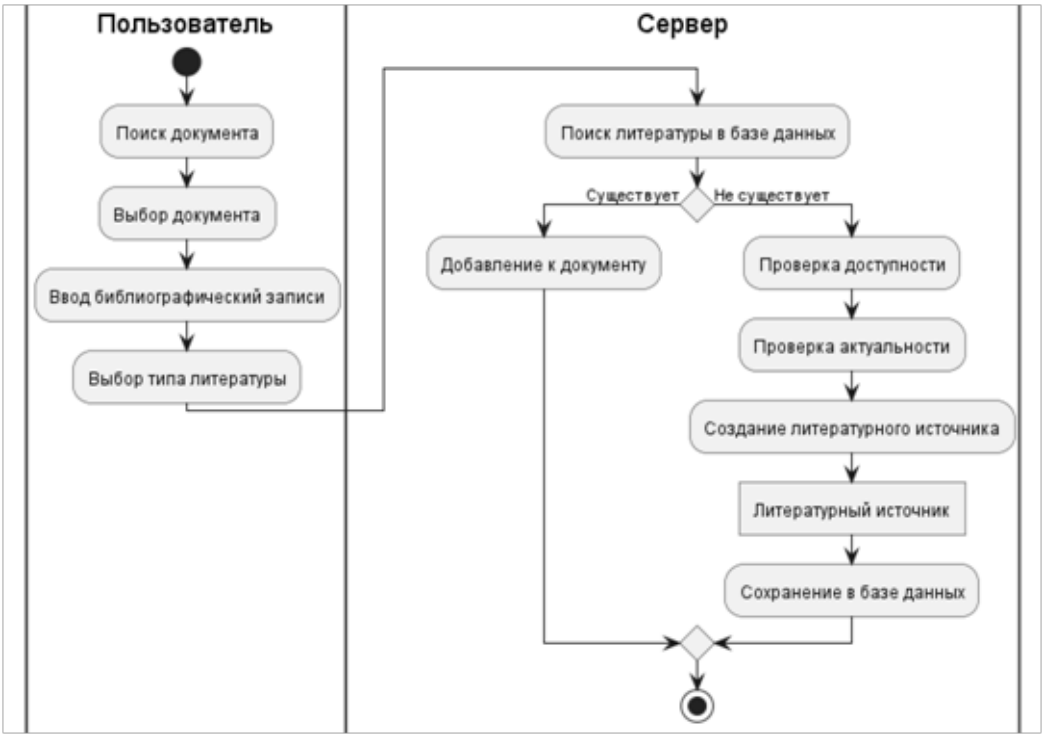



*Рисунок 2 – Диаграмма деятельности для процесса проверки литературного источника*




*Рисунок 3 – Диаграмма состояний для объекта «Литературный источник»*

Первым состоянием является «Заполнение информации об источнике», в момент входа (*entry*) загружается документ, для которого будет заполняться библиографический список. Пока объект находится в данном состоянии (*do*), добавляется библиографическая запись и выбирается тип литературного источника. На момент выхода (*exit*) источник добавляется в систему. После того как литературный источник заполнен и находится в системе, происходит проверка введенных данных. В момент входа (*entry*) происходит обработка источника, пока объект находится в данном состоянии (*do*), в системе отображается статус обработки, на момент выхода (*exit*) отображается конечный статус актуальности и доступности источника. После этого литературный источник может перейти в одно из

следующих состояний в зависимости от выполненного триггера:

– «Финальное», закончив взаимодействие, если после проверки источник оказался актуальным и доступным.

– «Перемещение источника из основного в дополнительный список», если литературный источник просрочен. В момент входа (*entry*) выбирается просроченный литературный источник, пока объект находится в данном состоянии (*do*), изменяется тип литературы с основной на дополнительную,на момент выхода (*exit*) отображается статус.

– «Удаление литературного источника». В момент входа (*entry*) выбирается недоступный литературный источник, на момент выхода (*exit*) недоступный источник удаляется.

На последнем этапе анализа и документирования требований создана диаграмма последовательности, отображающая последовательность событий, происходящих при проверке литературного источника, и обмен сообщениямимежду сущностями.

В процессе проектирования диаграммы последовательности выделены основные стереотипы и их назначения, представленные в таблице 1.

На диаграмме (рис. 4) показана последовательность добавления пользователем введенного им литературного источника в систему. Для начала пользователь выбирает документ, для которого ему необходимо изменить список литературных источников, после выбора отображаются данные для этого документа. Далее необходимо заполнить форму для добавления литературных источников, затем эта информация передается в систему, которая проверяет ее на актуальность и доступ к указанному источнику в рамках доступных электронных библиотечных систем. Если источник ранее уже был добавлен в базу данных, то он сохраняется для выбранного документа. Если источник является новым и не был сохранен в базе данных, то создается новый и сохраняется в веб-сервисе. В результате данных действий, веб-сервис возвращает статус проверки литературного источника. Также пользователю доступна возможность удалить неиспользуемый или недоступный существующий источник.

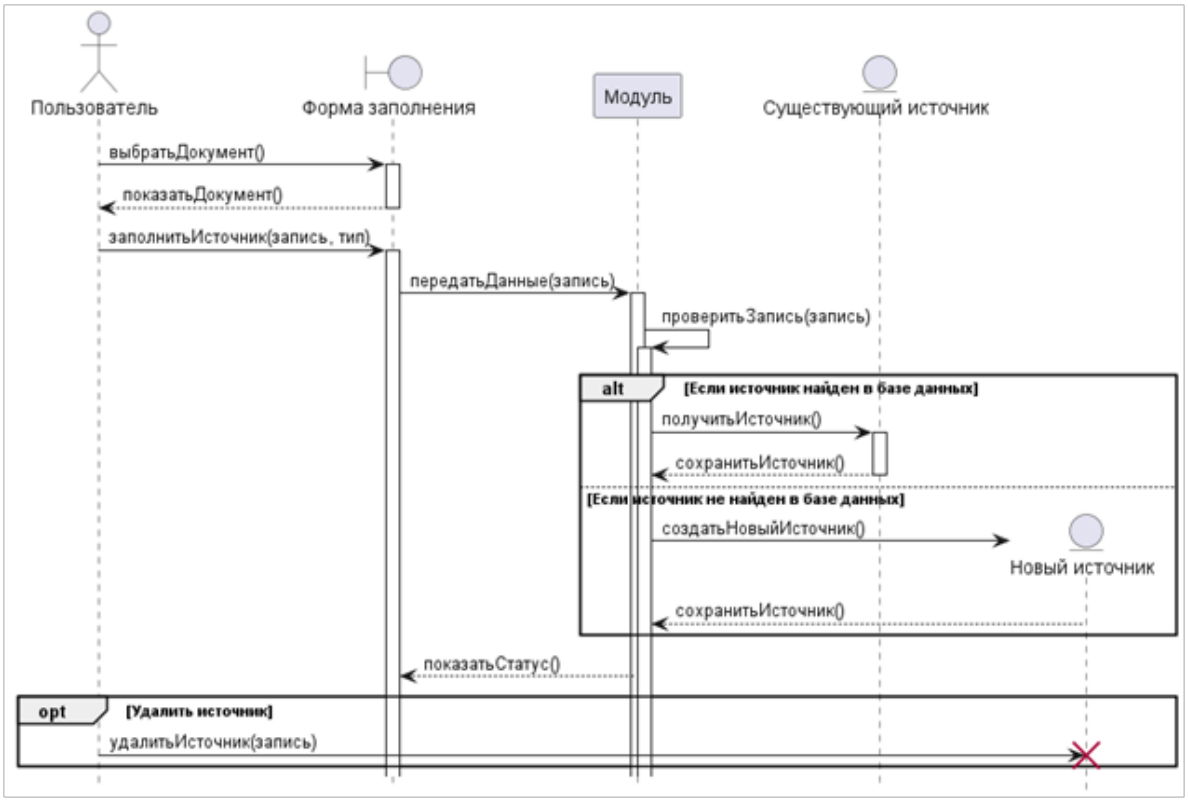



*Рисунок 4 – Диаграмма последовательности проверки библиографической записи*

*Таблица 1 – Список стереотипов и их назначение*

| Стереотип | Назначение |
|---|---|
| Пользователь | Взаимодействие с формой заполнения и системой |
| Форма заполнения | Передача данных в систему |
| Система | Сохранение и обработка данных |
| Существующий источник | Литературный источник, который уже был добавлен ранее |
| Новый источник | Новый литературный источник, который еще не был добавлен в систему |

*Проектирование дизайна пользовательского интерфейса и элементов веб-сервис.* Перед этапом разработки выполнено проектирование дизайна пользовательского интерфейса и элементов веб-сервиса (*UI*-дизайна). Ниже приведены основные элементы веб-сервиса актуальности и доступности литературных источников. Элемент статуса представлен в нескольких цветах (рис. 5), что позволяет пользователю интерпретировать его значение: серый используется для статуса обработки, красный – для отображения ошибки, зеленый – для успешно совершенного действия, желтый – для предупреждения.

Для отображения основной информации и взаимодействия с данными используется таблица. Ниже на рисунке 6 представлены ее основные элементы.

В верхней части рисунка изображены различные состояния, в которых может находиться заголовок таблицы: обычный, сортируемый и пустой. В нижней части рисунка показаны состояния, в которых могут находиться ячейки таблицы: информационная ячейка, ячейка со статусом, ячейка с выпадающим меню и ячейка со списком возможных действий. Разработанный интерфейс обладает широким списком возможностей, которые обеспечивают быстрое и удобное взаимодействие со списком литературных источников.

*Разработка и тестирование и отладка.* Ниже представлен обзор основных возможностей разработанного интерфейса системы.

Главная страница веб-сервиса (рис. 7) представляет из себя набор из нескольких основных элементов. В левой части экрана находится боковое меню, в котором есть поиск и инструменты для выбора документа, к которому нужно добавить литературные источники. В правой части экрана – основное содержание веб-сервиса.

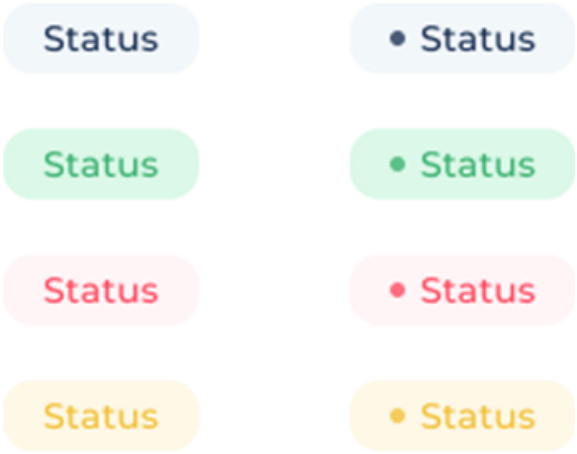



*Рисунок 5 – Графический элемент отображения статуса*

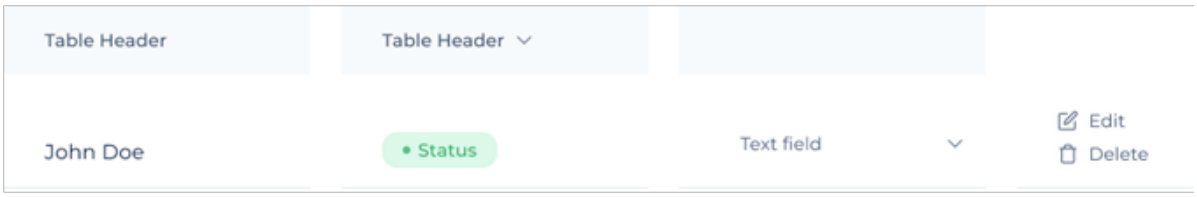



*Рисунок 6 – Элемент таблицы взаимодействия*

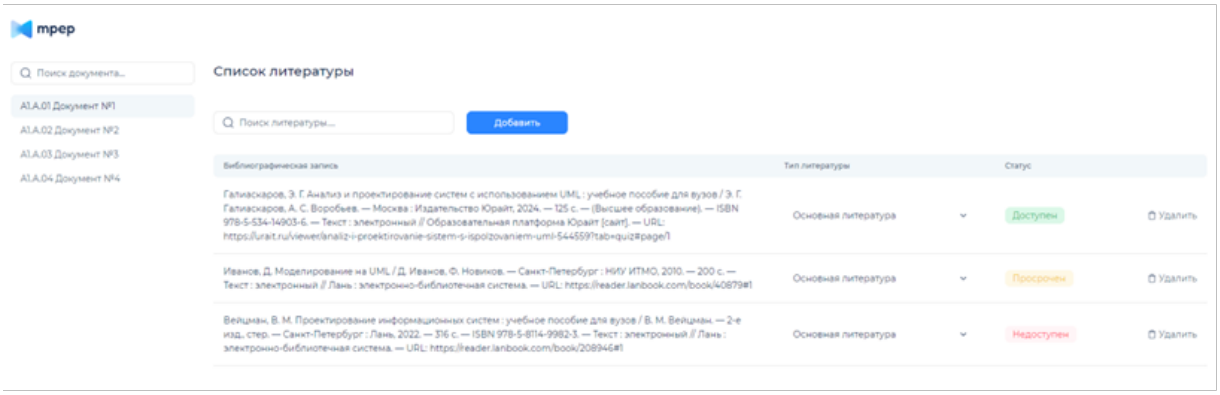



*Рисунок 7 – Главная страница веб-сервиса*

Основное содержание веб-сервиса начинается с заголовка, который включает в себя поле поиска необходимых литературных источников и кнопку с возможностью добавления нового источника. На рисунке 8 представлен вывод информации о литературном источнике: название, тип, статус и возможность удаления. Название отображает полную библиографическую запись литературного источника. Тип используется для быстрого переноса источника из основного в дополнительный и наоборот.

Статус предупреждает пользователя о состоянии литературного источника на данный момент и может меняться в зависимости от условий. Например, для статуса обработки используется серый статус, для сообщения о том, что основной литературе больше 5 лет используется красный статус. Если срок актуальности литературного источника подходит к концу или уже закончился (для основной – 5 лет), то будет отображаться желтый статус, что так же продемонстрировано на рисунке 8.

В конце каждой строки таблицы присутствует кнопка, которая дает возможность удалять лишнюю или недоступную информацию. С ее помощью можно легко освободить место для более актуальных и полезных источников. Таким образом, пользователи могут поддерживать целостность своего списка литературных источников, удаляя ненужные элементы.

Процесс добавления литературных источников происходит путем нажатия на кнопку «Добавить». После этого появляется модальное окно, предлагающее заполнить форму с основной информацией о источнике: библиографическая запись и тип источника. После заполнения всех необходимых полей и подтверждения добавления нового литературного источника, система приступает к его проверке, отправляя соответствующие запросы на сервер. Основная цель этих запросов – проверка достоверности и актуальности указанного источника. Ниже подробно разобран каждый из запросов:

– первый запрос проверяет наличие добавленного литературного источника у других документов в базе данных. Если данный источник уже был ранее сохранен в базе данных, то он прикрепляется к выбранному документу. Если же такая запись не была найдена, то запрос возвращает ошибку и переходит ко второму запросу;

– второй запрос проверяет литературный источник на ресурсах, которые были указаныв библиографической записи. Если литературный источник недоступен или не актуален, в таблице будет показан статус в состоянии «Недоступен». Если все условия выполнены, то в таблице отобразится зеленый статус «Доступен». В конце такого запроса происходит сохранение литературного источника в базе данных.

Если источник теряет свою актуальность или становится менее значимым для текущего документа, его можно быстро и легко перенести из основного списка используемого литературного источника в дополнительный список, что продемонстрировано на рисунке 9.

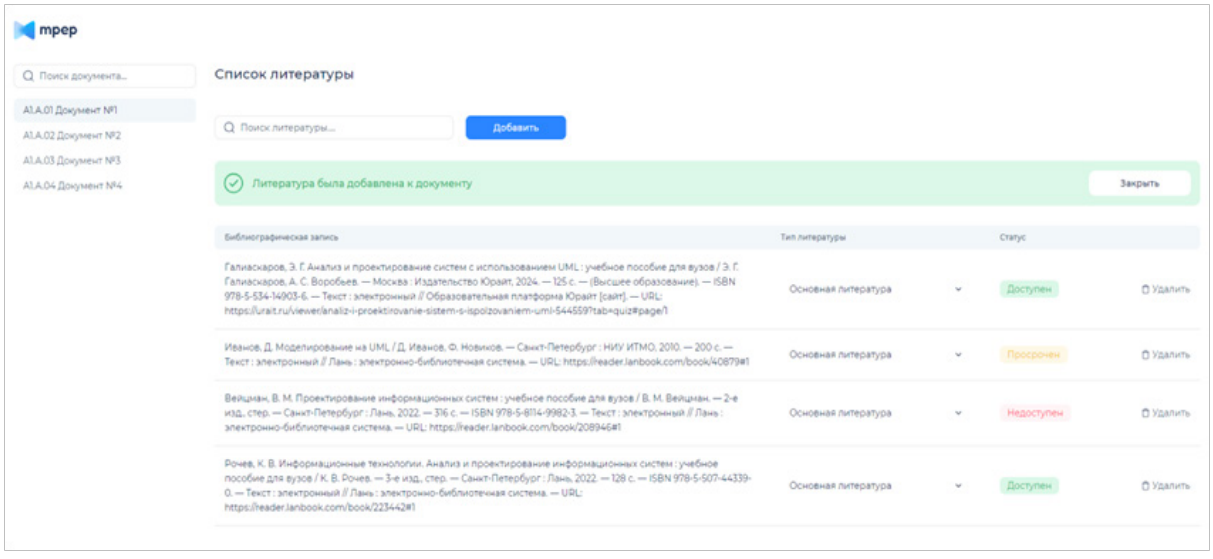



*Рисунок 8 – Варианты отображения литературных источников и их статусов*




*Рисунок 9 – Процесс перемещения литературного источника из основного в дополнительный*

Этот процесс осуществляется при помощи выпадающего меню, находящегося рядом с библиографической записью источника. В этом меню предлагается два варианта выбора – основная или дополнительная литература. При выборе пункта «Дополнительная литература» происходит изменение статуса источника с желтого на зеленый и сохранение изменений в системе. После выполненных действий, при формировании нового документа, указанный источник будет использоваться в разделе дополнительных литературных источников, вместо основного.

На заключительных этапах было проведено тестирование, включавшее в себя проверку каждой части веб-сервиса на соответствие требованиям, функциональности и безопасности, и отладка, заключавшаяся в идентификации, анализе и исправление ошибок в программном коде. Оба процесса были успешно завершены, при этом очевидно, что они являлись итеративными и повторяющимися в течение всего жизненного цикла программного продукта.

**Обсуждение.** Поэтапная разработка веб-сервиса для проверки актуальности и доступности литературных источников, соответствующая современным методологиям разработки программных проектов, определена:

– Анализ и документирование требований. В начале разработки веб-сервиса было проведено тщательное исследование требований пользователей и основных проблем, с которыми они сталкиваются при проверке актуальности и доступности литературных источников. Применение языка *UML* для формализации результатов этого этапа позволило наглядно представить функционал веб-сервиса, описать главные элементы. Кроме того, использование *UML* упростило дальнейший процесс разработки и способствовало выявлению возможных ошибок на ранних этапах. *UML* диаграммы также использованы для документации веб-сервиса и облегчения его дальнейшего сопровождения и совершенствования.

– Проектирование дизайна пользовательского интерфейса и элементов веб-сервиса. Этот этап заключался в создании удобного и интуитивно понятного интерфейса, чтобы пользователи могли легко найти необходимую информацию и функциональность.

– Разработка. На этом этапе происходила активная разработка кода веб-сервиса в соответствии с разработаннымфункционалом и алгоритмами на основе выбранного технологического стека. Благодаря миксинам код в проекте становится более модульным, гибким и читаемым. Это позволило реализовать вложенные элементы и сложные правила стилизации. Использование *React* значительно облегчило создание интерфейсов благодаря разбиению каждой страницы на небольшие фрагменты. К использованным преимуществам данной библиотеки можно отнести: гибкость и масштабируемость, что позволило легко добавлять новые функции и адаптировать веб-сервис к меняющимся требованиям; обеспечило компонентный подход, позволивший разбивать элементы веб-сервис на независимые компоненты, что упростит дальнейшую поддержку; увеличило производительность, за счет виртуального дерева *DOM* и механизма *reconciliation*.

– Тестирование и отладка. Каждый компонент программы тщательно тестировался для обеспечения его корректной работы и соответствия требованиям. Это включало модульное тестирование отдельных компонентов, интеграционное тестирование всего веб-сервиса и итоговое тестирование с участием реальных пользователей.

Выполнение этих этапов позволило создать программный продукт, отвечающий стандартам качества и ожиданиям конечных пользователей. Применение разработанного веб-сервиса позволяет упростить работу по актуализации учебных документов, путем автоматизации в области указания литературных источников. Предлагаемый сервис выполняет проверку литературных источников, самостоятельно формирует перечень литературы для дисциплины, переводит устаревающие по срокам источники из основной в дополнительную или информирует об отсутствии подходящих источников по причинам не соответствия сроков или ошибочной ссылки на источник в электронной библиотеке.

**Выводы.** Разработка программного проекта веб-сервиса для осуществления проверки актуальности и доступности литературных источников представляет собой важный шаг в решении задачи автоматизации процессов подготовки учебных документов. Результаты этого проекта являются основой для дальнейших улучшений и развития в данной области. Одной из важнейших составляющих успешного завершения проекта был выбор современных методик проектирования программных проектов. При этом выполнение сформулированных этапов: анализа и документирование требований, выбора технологий, разработки, тестирования и отладки – позволили создать высококачественный программный продукт, который соответствует ожиданиям и требованиям конечных пользователей. В настоящее время разработанный веб-сервис находится на этапе внедрения, планируется организовать поддержку и его обновление для обеспечения бесперебойной работы и соответствия изменяющимся потребностям пользователей.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Беликова С.С., Беликов А.В. Национальная система электронного документооборота как фактор цифровизации экономики //Академический вестник Ростовского филиала Российской таможенной академии. – 2021. – №. 2. – С. 21-27.

2. Pandey M. et al. AI-based Integrated Approach for the Development of Intelligent Document Management System (IDMS) //Procedia Computer Science. – 2023. – Т. 230. – С. 725-736.

3. Folgado F.J. et al. Review of Industry 4.0 from the Perspective of Automation and Supervision Systems: Definitions, Architectures and Recent Trends //Electronics. – 2024. – Т. 13. – №. 4. – С. 782.

4. Sternad Zabukovšek S., Jordan S., Bobek S. Managing Document Management Systems' Life Cycle in Relation to an Or-

ganization's Maturity for Digital Transformation //Sustainability. – 2023. – Т. 15. – №. 21. – С. 15212.

5. Mutimba C.J. Implementation of electronic document and records management system in the public sector: a case study of the Ministry of Higher Education Science and Technology : дис. – University of Nairobi, 2014.

6. Методология программной инженерии: учеб. пособие / Г.А. Доррер ; СибГУ им. М.Ф. Решетнева. – Красноярск, 2021. – 190 с.

7. Шульга Т.Э., Храмов Д.Э. Онтология жизненного цикла разработки программного обеспечения // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2023. – №. 2. – С. 66-74.

8. Ayaz A., Yanartaş M. An analysis on the unified theory of acceptance and use of technology theory (UTAUT): Acceptance of electronic document management system (EDMS) //Computers in Human Behavior Reports. – 2020. – Т. 2. – С. 100032.

9. KrishnaV., BasuA. Scrum+::Isit "ScrumBut" or "ScrumAnd" //2011 AnnualIEEEIndiaConference. – IEEE, 2011. – С. 1-4.

10. Бубнов А.А., Бубнов С.А., Майков К.А. Разработка и анализ требований к программному обеспечению: учебник / Бубнов А.А., Бубнов С.А., Майков К.А. – М: КУРС, 2022. – 176 с.

11. Blokdyk G. Functional Requirements The Ultimate Step-By-Step Guide. Toronto: 5STARCooks, 2021. – 291 p.

12. Abdurakhimovich U.A. The future of JavaScript: emerging trends and technologies //formation of psychology and pedagogy as interdisciplinary sciences. – 2023. – Т. 2. – №. 21. – С. 12-14.

*Статья поступила в редакцию 21.05.2024*
*Статья принята к публикации 17.06.2024*

УДК664.6/664.87
EDN: ZPOLZW

# ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРОКОЛЛОИДОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ ХЛЕБА ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА И ПРОДЛЕНИЯ СРОКОВ ЕГО ХРАНЕНИЯ

© Автор(ы) 2024
SPIN: 3587-8000
AuthorID: 895854
ORCID:0009-0009-1706-1153
**ГУЛОВА Тамара Ивановна,** старший преподаватель кафедры «Пищевая инженерия»
*Уральский государственный экономический университет*
*(620144, Россия, Екатеринбург, улица 8 Марта, 62/45, e-mail: gulovat@mail.ru)*
SPIN: 5145-1745
AuthorID: 1101199
ORCID: 0000-0003-0832-4547
**ЛЕОНТЬЕВА Светлана Александровна,** кандидат технических наук,
старший преподаватель кафедры «Пищевая инженерия»
*Уральский государственный экономический университет»*
*(620144, Россия, Екатеринбург, улица 8 Марта, 62/45, e-mail: sv-leo@bk.ru)*

**Аннотация.** Гидроколлоиды являются перспективными добавками, используемыми для улучшения реологических свойств пищевых продуктов. Гидроколлоиды могут оказать существенное влияние на качественные характеристики конечной продукции. Альгинат характеризуется биоразлагаемостью, биосовместимостью, нетоксичностью и высокой вязкостью, а также широким спектром ценных биологических и технологических свойств. Альгинаты использовались в качестве текстурирующих ингредиентов (обладающих загущающей и гелеобразующей способностью).В работе проведены исследования влияния альгината натрия на органолептические, физико-химические показатели муки, полуфабриката (теста) и готовых хлебобулочных изделий. Испытания проводили с внесением в рецептуру альгината натрия в количестве 0,5, 1,0 и 1,5% к массе муки. Было изучено, изменение состава готовых изделий при внесении добавки в различном количестве. Проведены исследования, по сроку хранения хлеба при добавлении в рецептуру гидроколлоидов. Была рассчитана пищевая ценность контрольного образца и экспериментальных образцов хлеба с альгинатом натрия. Для улучшения свойств, а также увеличению пищевой ценности продуктов хлебобулочных изделий из высшего сорта муки и продления срока годности, требуется вводить альгинат натрия в диапазоне от 0,5% до 1,0% по отношению к массе муки.

**Ключевые слова:** хлебобулочные изделия, пищевая ценность, продление сроков хранения, альгинаты, улучшение качества.

# APPLICATION OF HYDROCOLLOIDS IN BREAD PRODUCTION TO IMPROVE QUALITY AND EXTEND ITS STORAGE LIFE

© The Author(s) 2024
**GULOVA Tamara Ivanovna,** senior lecturer of the Department of Food Engineering
*Ural State Economic University*
*(620144, Russia, Ekaterinburg, 8 Marta Street, 62/45, e-mail: gulovat@mail.ru)*
**LEONTYEVA Svetlana Aleksandrovna**, ph.d., senior lecturer of the Department of Food Engineering
*Ural State Economic University*
*(620144, Russia, Ekaterinburg, 8 Marta Street, 62/45, e-mail: sv-leo@bk.ru)*

**Abstract.** Hydrocolloids are promising additives used to improve the rheological properties of food products. Hydrocolloids can have a significant impact on the quality characteristics of the final product. Alginate is characterized by biodegradability, biocompatibility, non-toxicity and high viscosity, as well as a wide range of valuable biological and technological properties. Alginates were used as texturizing ingredients (having thickening and gel-forming properties). The work carried out studies of the effect of sodium alginate on the organoleptic, physico-chemical parameters of flour, semi-finished product (dough) and finished bakery products. Tests were carried out with the addition of sodium alginate to the recipe in amounts of 0.5, 1.0 and 1.5% by weight of flour. It was studied how the composition of finished products changed when the additive was added in different quantities. Research has been conducted on the shelf life of bread when hydrocolloids are added to the recipe. The nutritional value of the control sample and experimental samples of bread with sodium alginate was calculated. To improve the properties, as well as increase the nutritional value of bakery products made from premium flour and extend shelf life, it is necessary to introduce sodium alginate in the range from 0.5% to 1.0% relative to the weight of flour.

**Keywords:** bakery products, nutritional value, shelf life extension, alginates,quality improvement.

***Для цитирования:*** *Гулова Т.И. Применение гидроколлоидов в производстве хлеба для улучшения качества и продления сроков его хранения / Т.И. Гулова, С.А. Леонтьева // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 2(66). – С. 69-75. – EDN: ZPOLZW.*

**Введение.** Хлеб – один из старейших продуктов питания в мире и основной продукт питания. Благодаря богатому содержанию сложных углеводов, клетчатки, растительных белков, витаминов группы В и минеральных солей, а также очень низкому содержанию жиров, эксперты по питанию определяют хлеб как неотъемлемую часть основы пищевой пирамиды [1].

Процесс хлебопечения начался с домашнего и ремесленного способа производства хлеба, заквашенного на закваске, приготовленного из смеси муки и воды. Однако на протяжении многих лет были изучены технологические, микробиологические и пищевые аспекты, применяемые в хлебопечении.

Черствение хлеба характеризуется физико-химическими изменениями, включая повышенную твердость, шероховатость, рассыпчатость, ухудшение сенсорных свойств и снижение усвояемости. Ухудшение качества хлеба связано с несколькими факторами, включая температуру хранения, содержание влаги, миграцию воды, структурные изменения клейковины и ретроградацию крахмала. Черствение хлеба может быть замедлено добавлением добавок.

Кроме того, срок годности хлебобулочных изделий без добавок и консервантов очень короткий, что противоречит нынешней потребительской тенденции получать в любое время свежий продукт, технологическо-питательные качества которого сохраняются во время употребления.

Использование натурального сырья в технологии производства пищевых продуктов является приоритетным направлением для улучшения ассортимента готовой продукции, придания ей новых потребительских характеристик [2]. В настоящее время обогащение хлебобулочных изделий добавками, направленное на улучшение их свойств, является приоритетным направлением.

Растет спрос на хлебобулочные изделия с повышенным содержанием питательных веществ, в них содержатся многие необходимые организму вещества: клетчатка, белки, жиры, углеводы, аминокислоты, витамины и др. [3].

С целью получения продуктов более высокого технологического качества и повышения их сохранности в хлебопекарной промышленности применяют ряд добавок [4].

Гидроколлоиды представляют собой гетерогенную группу длинноцепочечных полимеров, которые в основном известны как полисахариды и некоторые белки [5]. Эти полимеры получают из различных источников, таких как растения (например, гуммиарабик (*GA*), пектин, крахмал, камедь рожкового дерева (*LBG*), каррагинан), животные (например, желатин, хитозан), микроорганизмы (например, геллан). камедь, декстран, пуллулан, ксантановая камедь (*XG*) и/или химически модифицированные природные полисахариды (например, карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ)) [6].

Различные типы гидроколлоидов растительного, животного и микроорганизмного происхождения и химически модифицированные природные полисахариды широко используются для производства новых пищевых продуктов с заданной текстурой, реологией, термической стабильностью и пищевой ценностью, которые получили признание среди широкого круга потребителей.

Использование гидроколлоидов также может помочь производить более здоровые пищевые продукты за счет сокращения использования сахара, жира и других менее полезных для здоровья ингредиентов, сохраняя при этом желаемые сенсорные свойства [7].

Гидроколлоиды широко используются в пищевой промышленности или технологиях для обеспечения эффектов загущения или увеличения вязкости, которые могут изменить реологию и текстурные свойства пищевых продуктов [8].

Поэтому применение гидроколлоидов считается распространенной практикой в пищевой промышленности [9].

Выбор подходящих гидроколлоидов имеет решающее значение для разработки пищевых продуктов с желаемыми реологическими свойствами [10].

В последнее время интерес к морским гидроколлоидам возрос. Гидроколлоиды используют в хлебопекарной промышленности для улучшения текстуры хлеба, которая зависит от структуры мякиша [11]. Добавление гидроколлоидов позволяет получить хлебобулочные изделия с увеличенным объемом и пористостью, что приводит к более мягкому хлебу и лучшему восприятию его потребителями. Небольшое количество гидроколлоида, включенного в хлеб, может повысить влажность, снизить твердость и замедлить процесс ретроградации крахмала во время хранения в заморозке, тем самым продлевая срок хранения [12]. Различные гидроколлоиды поразному влияют на улучшение качества хлеба [13]. Морские гидроколлоиды могут быть безопасным и полезным для здоровья вариантом для разработки новых хлебобулочных изделий.

«Водоросли» – это собирательный термин, используемый для определения фотосинтезирующих и водных эукариот. По размеру водоросли разделяют на два типа: макроводоросли и микроводоросли [14]. Водоросли самая крупная и разнообразная группа растительноподобных организмов, варьирующихся от одноклеточных до многоклеточных форм. Самые крупные и сложные морские водоросли называются морскими водорослями. *Kappaphycus alvarezii* – красная водоросль, также называемая *Eucheuma Cot-*

*toni*. Разновидности *Kappaphycus* и *Eucheuma* богаты каротиноидами, пищевыми волокнами, белками, незаменимыми жирными кислотами, витаминами и минералами и используются главным образом в промышленном производстве фитоколлоидов, таких как агар-агар, альгинат и каррагинан. Каппарезии для ускорения роста волос, заживления ран и противораковых нутрицевтиков. *Kappaphycus spp.* используется в качестве сырья при производстве варенья, сыра, еды, чая, супа и лапши. Из видов *Kappaphycus* производят множество полезных для здоровья продуктов. такие как оздоровительные напитки, ликеры, желе, джемы, соус чили и шампунь.

В последние годы водоросли все чаще применяются в качестве пищевых ингредиентов с полезными свойствами, которые улучшают текстуру и вкус различных продуктов, включая хлебобулочные изделия. [15].

Таким образом, продукты, обогащенные водорослями, имеют большой потенциал благодаря высокой пищевой ценности, поскольку водоросли содержат полный комплекс незаменимых аминокислот., а основную часть жиров составляют полиненасыщенные кислоты. Кроме того, продукт богат йодом. Из витаминов в наибольшем количестве содержатся *B12, A, C, E, D, PP,* каротин.

В настоящем исследовании рассматривается использование натурального гидроколлоида – альгината натрия.

Альгинаты представляют собой анионные соли природных полисахаридов Обычно их извлекают из бурых морских водорослей и бактерий двух родов (*Azotobactersp*. и *Pseudomonassp*) [16]. Альгинат натрия представляет собой белый или светло-желтый порошок, образующий высоковязкий водный раствор, обладающий характеристиками загущения, суспендирования, эмульгирования, стабилизации, образования геля.

Из-за анионной природы альгинат натрия проявляет ионотропное гелеобразование в водной среде под действием катионов двух- и трехвалентных металлов, таких как $Al^{3+}$, $Fe^{3+}$, $Ca^{2+}$, $Zn^{2+}$, $Ba^{2+}$ и т.д. [17, 18].

Это ионотропное гелеобразование альгината натрия происходит в результате физического взаимодействия через межмолекулярные связи между группами – *COO*-структуры альгината и участвующими катионами металлов [19].

Альгинату натрия отдают предпочтение многие исследователи в области пищевой промышленности, биомедицины, очистки воды и упаковки пищевых продуктов. Альгинат натрия можно использовать в качестве стабилизатора в мороженом, безалкогольных напитках и фруктовых соках, а также в качестве загустителя в джемах, желе, помадке и маргарине для улучшения качества и вкуса пищевых продуктов [20]. Альгинат натрия используется в хлебопечении в качестве загустителя. Способность альгинатов снижать скорость черствения образцов хлеба объясняется ингибированием взаимодействия между глютеном и крахмалом.

**Методология.** Цель работы – изучение возможности применения гидроколлоидов в технологии производства хлеба пшеничного, их влияния на качество, сроки хранения, пищевую ценность хлебобулочных изделий. Определение оптимальных дозировок альгината натрия, учитывая оценку органолептических и физико-химических параметров качества хлеба.

Объекты работы:

− сырье (мука пшеничная хлебопекарная первого сорта, дрожжи хлебопекарные прессованные, соль поваренная пищевая, альгинат натрия);

− полуфабрикаты (тесто);

− готовая продукция: образец 1 – контроль (хлеб из муки пшеничной первого сорта); образец 2 – изделие с внесением 0,5% альгината натрия к массе муки; образец 3 – изделие с внесением 1% альгината натрия к массе муки; образец 4 – изделие с внесением 1,5% альгината натрия к массе муки.

Были определены следующие показатели муки пшеничной: цвет, вкус, запаха и хруст (ГОСТ 27558.7.4), влажность (ГОСТ 9404), зольность (ГОСТ 27494), белизна (ГОСТ 26361.7), количество и качество клейковины (ГОСТ 27839);

Газообразующую способность муки определяли с помощью прибора Яго-Островского. Сущность метода заключается в определении количества углекислого газа, выделяемого тестом за определенное время брожения.

Органолептические показатели соли, массовую долю влаги – по ГОСТ 13685.

Органолептические показатели, влажность, кислотность, подъемную силу хлебопекарных прессованных дрожжей – по ГОСТ 171.

Кислотность полуфабриката (теста) определяли методом титрования. Влажность полуфабрикатов (теста) определяли методом высушивания определенной навески теста при температуре 160°С в течение 5 минут на приборе Элекс.

В готовом продукте (хлебе) были определены следующие показатели: органолептические (ГОСТ Р 52462), влажность (ГОСТ 21094), кислотность (ГОСТ 5670), пористость (ГОСТ 5669), формоустойчивость (ГОСТ 27669), зольность (ГОСТ Р 51411), содержание клетчатки по методу Геннеберга.

**Результаты.** Перед началом исследований проверяли качественные показатели сырья, используемого для изготовления полуфабриката (теста), контрольного и экспериментальных образцов хлеба.

В результате проведенных исследований и полученных данных можно сделать вывод, что все виды сырья соответствуют требованиям стандартов по органолептическим и физико-химическим показателям.

Органолептические, физико-химические показатели качества альгината натрия представлены в таблицах 1, 2.

*Таблица 1 – Органолептические показатели альгината натрия*

| Показатели качества | Характеристики |
|---|---|
| Цвет | Буро-зеленый |
| Запах | запах водорослей (свойственен внесенной добавке) |
| Вкус | Привкус слабо-щелочной |
| Внешний вид и цвет | Продукт сухой, хлопьевидный |

*Таблица 2 – Физико-химические показатели альгината натрия*

| Показатели качества | Требования ТУ 15 – 544 – 83 | Фактические значения |
|---|---|---|
| Влажность,%, не более | 16,0 | 15,0 |
| Зола,%, не более | 23,0 | 18,8 |

По органолептическим и физико-химическим показателям альгинат натрия соответствует ТУ 15 – 544 – 83 Альгинат натрия пищевой. Технические условия

Были проведены эксперименты, в которых было добавлено альгината натрия в пшеничную муку в разных пропорциях: 0,5%, 1,0% и 1,5% от массы муки. После дополнительного исследования было обнаружено, что применение альгината натрия влияет на свойства клейковины, получаемой из пшеничной муки. Влияние альгината натрия на качество и количество клейковины в муке представлено на рисунке 1.

Исследование клейковины на приборе ИДК 3М показало, что ее качество от удовлетворительно-слабой, группа вторая, 87 ед. ИДК с увеличением количества добавки изменилось до удовлетворительно - крепкой, группа вторая, 47 ед. ИДК.

Исследовали упруго-пластические свойства выбродившего теста с помощью прибора Структурометр. С увеличением количества добавки деформация теста снижается, следовательно, упругость образцов теста возрастает, что подтверждает улучшение его упруго-пластических свойств. Это приводит к улучшению текстуры и структуры хлеба, а также повышению его срока годности.

Увеличение количества альгината натрия в муке приводит к улучшению ее способности образовывать газы. Это связано с тем, что альгинат натрия, будучи полисахаридом, является источником сахаров, а также стимулирует активность амилолитических ферментов, ответственных за разложение крахмала на сахара и образование газа.

Этап замеса способствует гидратации муки и за счет своего диспергирующего и распределяющего действия способствует образованию клейковинной сетки, задерживая воздух в виде крупных пузырьков, которые впоследствии распадаются на более мелкие. На этапе расстойки эти крошечные пузырьки воздуха поглощают $CO_2$ и этанол, образующиеся при дрожжевом брожении, и растут. Повышение температуры во время выпечки вызывает дополнительное образование $CO_2$ дрожжами до температуры их инактивации.

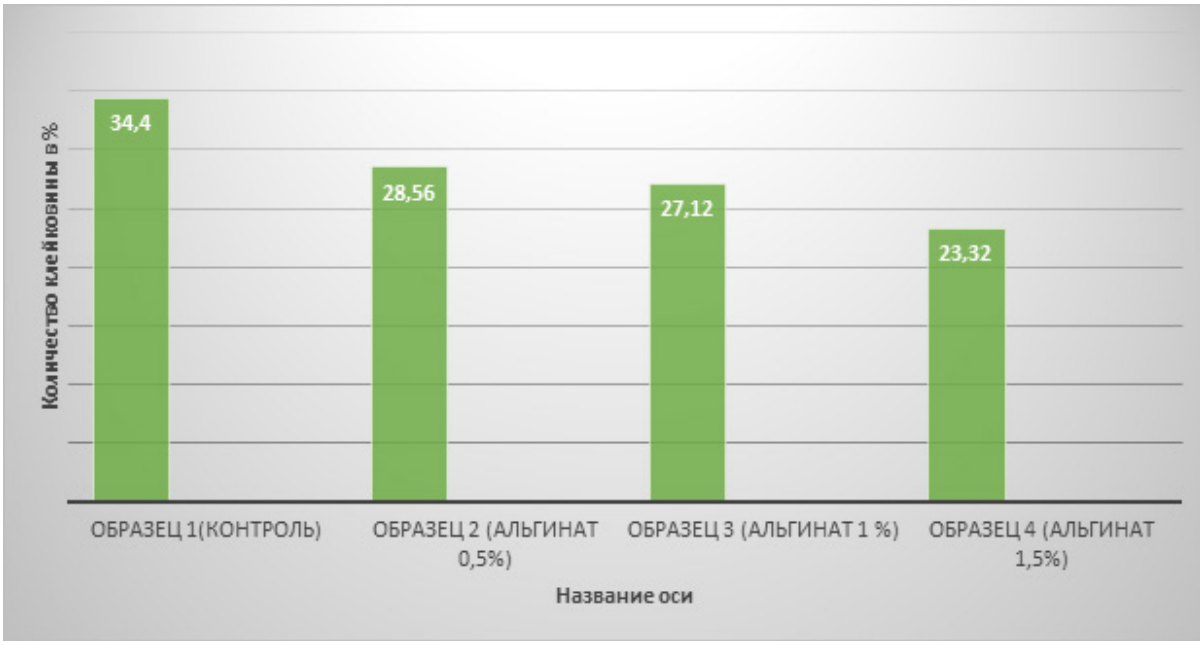



*Рисунок 1 – Влияние альгината натрия на количество и качество клейковины в муке*

Разработан технологический процесс приготовления теста на жидкой опаре из пшеничной муки первого сорта. В основное количество воды в опару добавляется альгинат натрия Опара должна иметь определенную консистенцию (жидкую), чтобы правильно взаимодействовать с альгинатом, добавляется пшеничная мука первого сорта. Количество муки рассчитывается с учетом требуемой консистенции опары. Оставшаяся часть воды используется для приготовления солевого раствора, который добавляется в тесто вместе с оставшейся мукой.

Замес теста проводится до получения однородной массы. Использование жидких опар для приготовления теста способствует хорошему набуханию и улучшает текстуру хлеба. Добавление альгината натрия в опару позволяет достичь желаемого результата.

Изготовление теста на жидких опарах с добавлением альгината натрия позволяет контролировать процесс набухания и улучшить текстуру хлеба. Качество хлеба улучшается за счет добавления гидроколлоидов. Добавленные гидроколлоиды помогают сохранить газообразность во время брожения, способствует улучшению структуры теста и структуры клейковины. Кроме того, взаимодействия между, гидроколлоидами и крахмалом дополнительно влияют на питательные качества.

Рецептура образцов хлеба, приготовленного на жидкой опаре, представлена в таблице 3.

В таблице 4 приведены результаты исследований зависимости органолептических и физико-химических показателей выпеченного хлеба от количества вносимой добавки.

В результате исследования образцов хлеба №1, №2, №3, №4 установлено, что непромес отсутствует, поверхность ровная, мякиш пропеченный, пористый. В образцах №1, №2, №3 вкус и запах совпадают. В образцах №1, №2 цвет корки светло-коричневый, цвет мякиша светло-серый. С увеличением количества добавки в образцах №3, №4 цвет корки изменился, стал коричневый, а цвет мякиша серый с кремовым оттенком. В образце №4 вкус приобретает горечь.

Добавка альгината натрия способствует улучшению формоустойчивости.

Формоустойчивость подового хлеба представлена в таблице 5.

*Таблица 3 – Рецептуры образцов пробной лабораторной выпечки хлеба*

| Наименование сырья и полуфабрикатов | Образец 1 (контроль) | | Образец 2 (дозировка альгината натрия 0,5%) | | Образец 3 (дозировка альгината натрия 1%) | | Образец 4 (дозировка альгината натрия 1,5%) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | опара | тесто | опара | тесто | опара | тесто | опара | тесто |
| Мука пшеничная 1с | 90,0 | 210,0 | 90,0 | 210,0 | 90,0 | 210,0 | 90,0 | 210,0 |
| Дрожжи прессованные | 3,0 | - | 3,0 | - | 3,0 | - | 3,0 | - |
| Соль поваренная | - | 3,9 | - | 3,9 | - | 3,9 | - | 3,9 |
| Альгинат натрия | - | - | 1,5 | - | 3,0 | - | 4,5 | - |
| Вода | 172,3 | 6,8 | 175,0 | 4,9 | 177,7 | 3,0 | 180,4 | 2,1 |
| Опара | - | 265,3 | - | 269,5 | - | 273,7 | - | 277,9 |
| ИТОГО: | 265,3 | 486,0 | 269,5 | 488,3 | 273,7 | 490,6 | 277,9 | 493,9 |

*Таблица 4 – Органолептические и физико-химические показатели хлеба из пшеничной муки первого сорта с альгинатом натрия*

| Наименование показателя | Образец 1 (контроль) | Образец 2 0,5% альгината натрия | Образец 3 1,0% альгината натрия | Образец 4 1,5% альгината натрия |
|---|---|---|---|---|
| Влажность,% | 42,3 | 42,5 | 42,6 | 42,7 |
| Кислотность, град | 3,1 | 3,1 | 3,0 | 2,8 |
| Пористость,% | 79,18 | 80,21 | 80,96 | 79,08 |
| Объемный выход, $см^3$/100 г муки | 246 | 250 | 253 | 241 |
| Зольность,% | 1,97 | 2,12 | 2,83 | 3,48 |

*Таблица 5 – Формоустойчивость подового хлеба*

| Наименование показателя | Образец 1 (контроль) | Образец 2 0,5% альгината натрия | Образец 3 1,0% альгината натрия | Образец 4 1,5% альгината натрия |
|---|---|---|---|---|
| Формоустойчивость | 0,46 | 0,48 | 0,52 | 0,52 |

У выпеченных образцов определяли величину усушки. Усыхание у контрольного образца составила 5,8%, у образца с содержанием 1,0% альгината натрия – 4,1%.

Внесение альгината натрия в хлеб способствует сохранению его качества при хранении. Это происходит благодаря способности альгината натрия удерживать влагу в мякише, что замедляет процесс черствения и ухудшения структуры хлеба.

**Обсуждение.** Влияние альгината натрия на процесс брожения муки связано с его способностью усиливать сбраживание сахаров, что в свою очередь приводит к повышению активности ферментов дрожжей. В ходе исследования были проведены эксперименты с использованием четырех образцов теста из высококачественной пшеничной муки. По результатам эксперимента было установлено, что увеличение количества добавленного альгината нат-

рия приводит к более интенсивному образованию газа. Контрольная порция, не содержащая альгината натрия, показала наименьшее количество образующегося газа. При добавлении 0,5% альгината натрия увеличивается объем теста, свидетельствующий о более интенсивном газообразовании. С добавлением 1,0% и 1,5% альгината натрия наблюдается еще большее увеличение объема теста и, следовательно, интенсивности газообразования. Кроме того, измерение кислотности теста каждый час позволяло оценить процесс брожения. Установлено, что с увеличением дозировки альгината натрия увеличивается скорость снижения кислотности. Это говорит о более быстром расщеплении крахмала на сахара и активности амилолитических ферментов, что способствует повышению газообразования. Повышение количества альгината натрия приводит к улучшению текстуры теста, делая его более упругим и эластичным.

Таким образом, добавление альгината натрия в пшеничную муку в разных пропорциях повышает газообразующую способность муки, ускоряет процесс брожения и улучшает реологические свойства теста. Кроме того, альгинат натрия способствует улучшению таких свойств как эластичность, воздухопроницаемость и объем, благодаря его гелеобразующим свойствам. В результате это может привести к более равномерному развитию структуры хлеба и лучшей текстуре.

Увеличение количества альгината натрия приводит к изменению цвета корки и мякиша хлеба. Это может быть связано с более интенсивным процессом меланоидинообразования, который происходит при наличии оставшихся в тесте несброженных сахаров. Также, образец с более высокой дозировкой альгината натрия (от 1,5%) имеет слабо выраженный горький привкус.

Кислотность мякиша снижается с повышением дозировки добавки (от 3,1 град в контрольном образце до 2,8 град в образце с содержанием 1,5% альгината натрия), что связано со слабощелочной средой введенного альгината натрия. Это подтверждает представление о том, что альгинат натрия влияет на структуру и текстуру готового продукта. Увеличение дозировки может привести к усилению укрепления клейковины, что делает мякиш более плотным и упругим. Образцы 2 и 3 достигли оптимальных показателей по органолептике и физхимии.в отличие от образца номер 4, в котором органолептические показатели ухудшались.

**Выводы.** Как правило, качество выпечки хлеба может быть связано с несколькими параметрами, такими как качество муки, содержание клейковины и реологические свойства теста.

Согласно проведенным исследованиям, при дозировке альгината натрия в диапазоне 0,5-1,0%, полученный хлеб удовлетворяет требованиям ГОСТ 31805-2012 «Изделия хлебобулочные из пшеничной муки. Общие технические условия» по органолептическим и физико-химическим показателям. Тем не менее, образец с содержанием альгината натрия 1,5% не соответствует по органолептическим показателям. Это может означать, что превышение указанной дозировки может повлиять негативно на вкус, аромат или другие свойства хлеба.

Из проведенных лабораторных исследований можно сделать вывод, что добавление альгината натрия в хлеб способствует увеличению клетчатки. По сравнению с контрольным образцом у образца с дозировкой альгината натрия 1% количество клетчатки выросло на 50% (0,68% клетчатки в образце без добавки, 1,39% клетчатки в хлебе с добавкой).

При увеличении количества альгината натрия зольность готовых изделий также повышается по сравнению с контролем, что указывает на увеличение содержания минеральных веществ в хлебе и его общую пищевую ценность.

Альгинат натрия имеет свойства удерживать влагу и образовывать гелевую структуру, что может способствовать улучшению текстуры, свежести и мягкости хлеба. Кроме того, добавление альгината натрия может также увеличить пищевую ценность хлеба, добавив в него больше минеральных веществ. Этот ингредиент может помочь увеличить сроки хранения хлеба, за счет его поддержания влажности и предотвращения преждевременного высыхания.

Огромный спектр гидроколлоидов, извлеченных из морских водорослей и богатых анионными группами, обладает замечательным потенциалом в качестве гелеобразующих агентов, благодаря своей исключительной способности создавать высокоэффективные гелевые сети. Это свойство делает их востребованным ингредиентом в пищевой промышленности для достижения оптимального гелеобразования и текстуры в широком спектре пищевых продуктов.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Балыхин М.Г., Шайлиева М.М., Цыпин А.П. Статистическое исследование потребления хлеба и развития хлебопекарной отрасли России // Продовольственная политика и безопасность. – 2021. – Т. 8. – № 1. – С. 97-106.

2. K. Kotsiou, D.-D. Sacharidis, A. Matsakidou, C.G. Biliaderis, A. Lazaridou. Impact of roasted yellow split pea flour on dough rheology and quality of fortified wheat breads. Foods, 10 (8) (2021). – P. 1832.

3. J.M. Boff, V.J. Strasburg, G.T. Ferrari, H. de Oliveira Schmidt, V. Manfroi, V.R. de Oliveira. Chemical, technological, and sensory quality of pasta and bakery products made with the addition of grape pomace flour. Foods, 23 (2022). – P. 2304-8158.

4. Ершов П.С. Сборник рецептур на хлеб и хлебобулочные изделия // Год издания 2018. – 208 с.

5. A. Yemenicioğlu, S. Farris, M. Turkyilmaz, S. Gulec. A review of current and future food applications of natural hydrocolloids. International Journal of Food Science and Technology, 55 (4) (2020). – P. 1389-1406.

6. N. Zhang, Q. Zhou, D. Fan, J. Xiao, Y. Zhao, K.W. Cheng, et al. Novel roles of hydrocolloids in foods: Inhibition of toxic maillard reaction products formation and attenuation of their harmful effects Trends in Food Science & Technology, 111 (2021). – P. 706-715.

7. Masud Alam, Kirty Pant, Dilpreet Singh Brar, Basharat Nabi Dar, Vikas Nanda, Exploring the versatility of diverse hydro-

colloids to transform techno-functional, rheological, and nutritional attributes of food fillings, Food Hydrocolloids,Volume 146, Part A, January 2024.

8. Y.C. Liao, C.C. Chang, D. Nagarajan, C.Y. Chen, J.S. Chang. Algae–derived hydrocolloids in foods: Applications and health–related issues. Bioengineered, 12 (1) (2021). – P. 3787-3801.

9.S. Huang, C. Chi, X. Li, Y. Zhang, L. Chen. Understanding the structure, digestibility, texture and flavor attributes of rice noodles complexation with xanthan and dodecyl gallate. Food Hydrocolloids, 127 (2022), Article 107538.

10. D.J. McClements Food hydrocolloids: Application as functional ingredients to control lipid digestion and bioavailability (August 2020) Food Hydrocolloids, 111 (2021), Article 106404.

11. C. Ferrero Hydrocolloids in wheat breadmaking: a concise review Food Hydrocolloid, 68 (2017). – P. 15-22. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2016.11.044.

12. N. Kang, C.K. Reddy, E.Y. Park, H.D. Choi, S.T. Lim Antistaling effects of hydrocolloids and modified starch on bread during cold storage LWT Food Sci. Technol., 96 (2018). – P. 13-18.

13. A. Guarda, C.M. Rosell, C. Benedito, M.J. Galotto Different hydrocolloids as bread improvers and antistaling agents Food Hydrocolloid, 18 (2004). – P. 241-247.

14. X. Zhang, T. Zhang, Y. Zhao, L. Jiang, X. Sui Structural, extraction and safety aspects of novel alternative proteins from different sources Food Chemistry, 137712 (2023).

15. Â.P. Matos, E. Novelli, G. Tribuzi Use of algae as food ingredient: Sensory acceptance and commercial products Frontiers in Food Science and Technology, 2 (2022), Article 989801.

16. R. Ahmad Raus, W.M.F. Wan Nawawi, R.R. Nasaruddin. Alginate and alginate composites for biomedical applications. Asian Journal of Pharmaceutical Sciences, 16 (2021). – P. 280-306.

17. A.K. Nayak, M.S. HasnainIonotropically gelled alginate particles in sustained drug release A.K. Nayak, M.S. Hasnain (Eds.), Alginates in Drug Delivery, Academic Press, Elsevier Inc., United States (2020). – P. 203-230.

18. D. Pal, A.K. Nayak Alginates, blends and microspheres: controlled drug delivery M. Mishra (Ed.), Encyclopedia of Biomedical Polymers and Polymeric Biomaterials, vol. I, Taylor and Francis, New York (2015). – P. 89-98.

19. S. Racovita, S. Vasilu, M. Popa, C. Luca Polysaccharides based micro- and nanoparticles obtained by ionic gelation and their applications as drug delivery systems Rev. Romaine de Chim., 4 (2009). – P. 709-718.

20. B. Zhu, F. Ni, Q. Xiong, Z. Yao. Marine oligosaccharides originated from seaweeds: source, preparation, structure, physiological activity and applications. Crit. Rev. Food Sci. Nutr., 61 (2020). – P. 60-74.

*Статья поступила в редакцию 17.03.2024*
*Статья принята к публикации 17.06.2024*

УДК 635.8: 664.7
EDN: PEILIR

# ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛУЗГИ ГРЕЧИХИ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ ВЕШЕНКИ ОБЫКНОВЕННОЙ НА СУБСТРАТАХ РАЗНОГО СОСТАВА

© Авторы 2024

SPIN-код автора: 9953-0790
AuthorID: 355511
ORCID: 0000-0003-1410-409C

**КРАМАРЕНКО Максим Владимирович**, доцент
*Институт агроэкологии - филиал ФГБОУ ВО Южно-Уральский ГАУ*
(*456660, Челябинская область, Красноармейский район, с. Миасское, ул. Советская 8,*
*e-mail: mkram76@yandex.ru*)

SPIN-код: 1627-6405,
AuthorID: 778703
ORCID: 0009-0007-3409-338X

**КИРЕЕВА Наталья Васильевна**, доцент, исполняющий обязанности заведующего кафедрой
*Институт агроэкологии - филиал ФГБОУ ВО Южно-Уральский ГАУ*
(*456660, Челябинская область, Красноармейский район, с. Миасское, ул. Советская 8,*
*e-mail: knv_1976@inbox.ru*)

**Аннотация.** На сегодняшний день в России активно наращиваются объёмы производства грибоводческой продукции. Далеко не все крупнотоннажные органические отходы пищевых производств подробно изучены с точки зрения возможности их использования в качестве питательного субстрата для культурных грибов. Целью данной работы был анализ свойств лузги гречихи, позволяющих определить её роль в субстрате для выращивания вешенки обыкновенной. Экспериментально подтверждена возможность получения урожая грибов с субстрата на основе лузги гречихи при условии её смешивания с органическими компонентами более мелкой фракции. Достигнутый в ходе эксперимента уровень продуктивности оказался на уровне около 260 г в расчёте на 1 кг сырого веса субстрата. Этот уровень можно считать средним относительно массы блока, но он недостаточно высок с точки зрения использования сухой массы субстрата в продукционном процессе. Достоверно установлено, что состав добавляемого к лузге измельчённого компонента может в значительной степени влиять на динамику плодоношения грибной культуры. Добавление опила хвойных пород к лузге гречихи привело к наиболее быстрой реализации продуктивного потенциала субстрата, что важно с точки зрения экономической эффективности производства.

**Ключевые слова:** лузга гречихи, мицелий, вешенка обыкновенная, грибоводство, опил, гречишные пеллеты, лигнин, целлюлоза, субстрат, хлорная известь.

# THE EFFICIENCY OF USING BUCKWHEAT HUSKS IN OYSTER MUSHROOM GROWING ON SUBSTRATES OF VARIOUS COMPOSITIONS

© The Authors 2024

**KRAMARENKO Maksim Vladimirovich**, associate professor
*Institute of Agroecology - branch of the South Ural State Agrarian University*
*(456660, Chelyabinsk region, Krasnoarmeysky district, Miasskoye village, Sovetskaya str. 8,*
*e-mail: mkram76@yandex.ru*)

**KIREEVA Natalya Vasilyevna**, associate professor, acting head of the department
*Institute of Agroecology - branch of the South Ural State Agrarian University*
*(456660, Chelyabinsk region, Krasnoarmeysky district, Miasskoye village, Sovetskaya str. 8,*
*e-mail: knv_1976@inbox.ru*)

**Abstract.** Nowadays the volume of production of mushroom growing is being actively increased in Russia. Not all of large-scale organic waste of food production is explored in detail in terms of their availability of being used as a nutritious substrate for cultivated mushrooms. The purpose of this work was the analysis of characteristics of buckwheat husks, allowing to define their role in a substrate for growing oyster mushroom. Opportunity of harvesting mushrooms from the substrate on the base of buckwheat husks mixed with organic components of a finer fraction is experimentally proved. The level of productivity achieved during the experiment turned out to be 260 g per 1 kg of wet weight of substrate. This level can be considered average relatively to the mass of the block but it is not high enough in terms of usage of the dry mass of the substrate in the production process. It is reliably established that the composition of crushed component added to husks can noticeably affect the dynamic of cultivated mushroom harvest production. Mixing of conifer sawdust and buckwheat husks caused the fastest realization of productiveness capacity of substrate, which is important in terms of economic efficiency of production.

**Keywords:** buckwheat husks, mycelium, oyster mushroom, mushroom growing, sawdust, buckwheat pellets, lignin, cellulose.

***Для цитирования:*** *Крамаренко М.В. Эффективность использования лузги гречихи при выращивании вешенки обыкновенной на субстратах разного состава / М.В. Крамаренко, Н.В. Киреева // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 2(66). – С. 76-80. – EDN: PEILIR.*

**Введение.** Лузгу гречихи, как отход крупяного производства, можно отнести к органическим материалам, возможность использования которых в качестве питательного субстрата для культурных грибов-ксилотрофов на сегодняшний день недостаточно изучена. Это объясняется тем, что грибоводство в России – относительно молодая отрасль, нынешние объёмы производства свежих грибов в цехах в несколько раз превосходят тот уровень, который был достигнут ещё несколько лет назад [1].

Лузга гречихи как материал обладает специфичным составом. Её массовый выход по стране оценивается в 60 тыс. тонн ежегодно [2]. Проводятся исследования, в ходе которых изучается использование лузги в разных направлениях: в качестве топлива [2], источника пищевых волокон для продуктов питания [3], пищевых красителей [4], изготовления лекарственных препаратов [5], очистки сточных вод [6]. Активно ведутся работы по разработке биополимерных материалов с применением данного материала в рамках экологической повестки [7]. При этом, экологическая нагрузка на окружающую среду при выращивании грибов в основном сводится к выделению $CO_2$ в атмосферу [8].

Попытки использовать лузгу гречихи в качестве субстрата для вешенки обыкновенной предпринимаются достаточно регулярно. В качестве основы субстрата для вешенки данный тип лузги упоминается в работе А.Д. Тишенкова за 1999 год [9]. Сведения об исследуемом материале ограничиваются рекомендацией определённого режима пастеризации в процессе подготовки к инокуляции.

В исследованиях БГТУ [10] упоминается, что лузга гречихи может использоваться при выращивании вешенки, но сложное сочетание лигноцеллюлозных соединений приводится в качестве обстоятельства, затрудняющего приготовление субстрата. Подробных разъяснений, в чём проявляются эти трудности, авторы, к сожалению, не приводят.

Запатентована поточная линия выращивания вешенки [11], где автор среди прочего рекомендует в процессе приготовления субстрата к соломе добавлять лузгу гречихи, доводя её массовую долю до 30% среди лигноцеллюлозных компонентов. В таком решении автор видит несколько положительных эффектов: лузга заполняет возможные пустоты между соломенными частицами, разрыхляет субстрат и удлиняет период плодоношения.

Найти в научной литературе более подробные описания по исследованию лузги гречихи в качестве основы для грибного субстрата не удалось. Рассматривая подход автора вышеупомянутого патента [11] к использованию лузги в субстрате можно отметить следующее. В данном случае нет попытки рассматривать лузгу гречихи как самодостаточный полноценный субстрат, по аналогии с лузгой подсолнечника или соломой зерновых злаков. Вместо этого выделяются некоторые особые свойства исследуемого материала, которые при смешивании его с другим субстратным материалом позволяют получить в итоге субстрат, превосходящий по производственной ценности оба исходные компонента, взятые по отдельности.

Обобщив научные сведения, представленные в рассмотренных выше источниках, можно констатировать факт, что успешные случаи использования для приготовления грибных субстратов лузги гречихи в научной литературе не описаны, хотя попытки использовать данный материал по аналогии с распространёнными субстратными основами предпринимались. Следовательно, её не следует рассматривать как аналог лузги подсолнечника, широко используемой в качестве субстрата для выращивания грибов [12]. Перспективным направлением исследований следует считать изучение воздействия отдельных свойств материала, которые, при внесении его в грибной субстрат, могут изменить его конечные свойства в значимую с точки зрения производства сторону. Например, аналогичный подход рекомендуется к использованию торфа в формировании грибного блока [13].

Есть несколько важных свойств у различных фаз грибного субстрата [9], на которых введение в его состав лузги гречихи может отразиться в наибольшей степени.

Твёрдая фаза – источник питательных элементов и энергии для культурного мицелия. Лузга гречихи имеет существенные отличия в биохимическом составе от привычного грибам – ксилотрофам субстрата – древесины [7, 14]. Есть большая вероятность того, что ферменты грибов, эффективно расщепляющие древесину, окажутся менее эффективными при расщеплении органических полимеров лузги гречихи.

Жидкая фаза – формирует водную среду для протекания обмена веществ в гифах культуры. Для грибов влага, связанная набухшими органическими соединениями, предпочтительнее, чем капельножидкая вода в субстрате. Способность к набуханию у лузги гречихи низкая, согласно нашим наблюдениям, даже после многочасового кипячения в воде количество удерживаемой материалом влаги не возрастает, в отличие от древесных опилок или соломы.

Газовая фаза – должна обеспечивать доступ кислорода воздуха к гифам культуры на всю глубину субстрата. Поскольку частицы лузги гречихи долго сохраняют упругость, их присутствие в субстрате препятствует его уплотнению и, следовательно,

должно положительно сказываться на обеспечении грибной культуры кислородом.

Следовательно, для того, чтобы субстрат на основе лузги гречихи был полноценным, к ней должен быть добавлен компонент, богатый легкодоступными для грибов – ксилотрофов веществами и обладающий высокой способностью к набуханию. Этим критериям удовлетворяют древесные опилки мелких фракций. В чистом виде они не используются в качестве субстрата для грибов именно из-за недостаточной аэрации внутри этого материала, смешивание с лузгой гречихи способно решить эту проблему.

**Методология.** Целью проведённых исследований стала проверка гипотезы, которая заключается в том, что для формирования в грибном субстрате приемлемых для развития культурного мицелия условий, лузга гречихи не может использоваться в качестве лигноцеллюлозной основы в чистом виде, а только с добавлением к ней другого лигноцеллюлозного компонента, способствующего лучшему удержанию влаги.

Экспериментальная проверка данного предположения проведена в Институте агроэкологии – филиале ФБГОУ ВО ЮУрГАУ.

Лузга гречихи, используемая для приготовления субстратов, не подвергалась отмыванию от мучки, вносилась в субстрат в доле 66 % от его суммарного лигноцеллюлозного компонента. В качестве второго компонента рассматривались опил лиственных пород, хвойных пород и лузга гречихи в измельчённом виде. Учитывая, что разные партии опилок, взятые непосредственно с производств пиломатериалов, могут сильно варьировать по важнейшим для роста грибов свойствам, было решено использовать в качестве источника материала топливные элементы (берёзовые брикеты, хвойные пеллеты, гречишные пеллеты). В качестве посевного материала использовался зерновой мицелий вешенки обыкновенной (*pleurotus ostreatus*) штамма Р-80. Подготовка субстрата осуществлялась его замачиванием в холодной суспензии гашёной и хлорной извести с нормой расхода 50 г каждого компонента на 20 л воды, используемых для приготовления одного грибного блока. После полного погружения субстрата в суспензию производился слив избыточной жидкости через сито, а после стекания – инокуляция посевным материалом. Вышеуказанный метод подготовки субстрата не используется на грибных производствах, поэтому результаты эксперимента можно использовать только для установления биологических закономерностей развития мицелия вешенки на субстратах разного состава.

Инокуляция проводилась в помещении, не оборудованном согласно требованиям создания чистой зоны.

Норма расхода мицелия – 350 г на 1 грибной блок. Выход урожая плодовых тел учитывался по каждому блоку индивидуально. В качестве питательной добавки использовалось зерно ячменя, замоченное в горячем растворе кальцинированной соды (7%), а затем высушенное [15]. Она вносилась в субстрат в количестве 200 г на 1 блок, перед внесением мицелия. Влажность блока определялась косвенно, путём сопоставления итоговой массы блока после инокуляции и массы составляющих его компонентов до замачивания.

В качестве лигноцеллюлозной основы субстрата на 1 блок затрачивалось 2 кг лузги и 1 кг водоудерживающего компонента. По каждому варианту состава субстрата заложено 9 блоков, что позволило обработать экспериментальные данные методом дисперсионного анализа. Продуктивность блока вычислялась как отношение массы полученного с блока урожая к массе грибного блока в момент его закладки.

**Результаты.** Итоговая продуктивность блоков за весь период плодоношения при разном составе водоудерживающего компонента оказалась практически на одном уровне (табл. 1). Следовательно, наличие смолы в хвойном опиле, как и наличие тяжело расщепляемых соединений в гречишном пеллете не проявили значимого воздействия на итоговую продуктивность блока.

*Таблица 1 – Продуктивность блоков вешенки обыкновенной при разном составе субстрата на основе лузги гречихи*

| Состав лигноцеллюлозных компонентов блока | Влажность блока, % | Выход плодовых тел относительно массы блока, % | Продуктивность в первые 40 суток после инокуляции, кг с 1 блока |
|---|---|---|---|
| Лузга гречихи, 3 кг | 53,0 | - | - |
| Лузга гречихи, 2 кг + брикет берёзовый, 1 кг | 57,9 | 25,9 | 0,979 |
| Лузга гречихи, 2 кг + пеллеты гречишные, 1 кг | 57,1 | 26,6 | 1,042 |
| Лузга гречихи, 2 кг + пеллеты хвойные, 1 кг | 60,4 | 26,0 | 1,233 |
| $НСР_{05}$ | 1,2 | $F_ф < F_{05}$ | 0,158 |

Но кроме суммарной продуктивности грибного блока за период плодоношения значение имеет также динамика его продуктивности. Производители грибов стремятся к тому, чтобы блок реализовывал свой потенциал продуктивности как можно скорее, так как это позволяет быстрее освободить помещение для загрузки новыми блоками и, одновременно, минимизировать накопление в цехе нежелательных организмов, особенно насекомых.

По показателю быстрой реализации урожайного потенциала вариант субстратной смеси с добавлением хвойных пеллет имеет достоверное преимущество над двумя другими (табл. 1). Преимущество над вариантом с добавлением гречишных пеллет составило 191 г с 1 блока за 40 дней с момента инокуляции, а по сравнению с блоками с берёзовыми опилками – 254 г.

Можно отметить, что более высокая продуктивность в первые недели соответствует достоверно более высокой влажности блоков по данному варианту.

О влиянии исследуемых составов субстрата на динамику формирования плодовых тел вешенки позволяет судить график, отображённый на рисунке 1. По информации, отображённой на графике, заметно, что после 40 суток с момента закладки блока его продуктивность за единицу времени снижается в 3-5 раз по сравнению с предыдущим периодом и впоследствии на протяжении 3-х месяцев плавно уменьшается до нулевых значений.




*Рисунок 1 – Динамика плодоношения вешенки обыкновенной при разном типе водоудерживающего компонента в субстрате на основе лузги гречихи*

**Обсуждение.** Оптимальная итоговая влажность грибного блока, согласно литературным данным [9], должна быть в пределах 65-75%. Из-за слабой способности лузги гречихи к набуханию при её использовании в качестве субстрата в чистом виде итоговое значение этого показателя оказывается на 12 % ниже минимального рекомендуемого. При таком недостатке влаги в субстрате вешенка обыкновенная не формирует плодовых тел в значимых количествах. Внесение в лузгу измельчённых лигноцеллюлозных материалов в доле 33% позволило приблизить уровень влажности к рекомендуемому на 5-7%, и этого эффекта оказалось достаточно, чтобы выход плодовых тел культуры составил 26-27%. Этот уровень считается приемлемым в грибоводческой отрасли, но, если сравнивать с блоками на основе обычного соломенного субстрата, ресурсы лигноцеллюлозного субстрата в эксперименте использовались на низком уровне. В производстве считается нормой, если на 1 кг грибов затрачивается 1 кг соломы [16].

Кроме низкой влажности субстрата могут быть и другие причины такого слабого усвоения грибами его твёрдой фазы. Это может быть высокая устойчивость вещества лузги гречихи к расщеплению ферментами грибов ксилотрофов. Также используемое в эксперименте холодное замачивание не способствует активному набуханию опилок и частичному гидролизу органических полимеров субстрата, т.е. не делает их более доступными для усвоения грибами. При использовании других способов подготовки субстрата (щелочная гидротермия, ферментация [17]) можно ожидать, что выход плодовых тел будет более высоким. Повышению выхода плодовых тел может также способствовать проведение инокуляции в чистой зоне, что позволит минимизировать негативное воздействие нежелательных микроорганизмов на урожай. Наличием остатков смолы в хвойных опилках можно объяснить достоверное преимущество добавления хвойных опилок по сравнению с использованием берёзовых по показателю продуктивности культуры в первые недели плодоношения. Смола, как вещество, обладающее антисептическими свойствами, может ослаблять негативное воздействие микробиологических контаминантов на урожай грибов.

**Выводы.** Лузга гречихи в чистом виде не может использоваться как лигноцеллюлозный компонент субстрата для выращивания вешенки обыкновенной, главным её недостатком является слабая способность к намоканию. Уровень влажности такого субстрата (53%) не позволяет рассчитывать на получение плодовых тел в значимых количествах.

Повысить влажность субстрата до приемлемого уровня можно добавляя к лузге гречихи органические лигноцеллюлозные материалы с более мелкими размерами частиц, опилки хвойных или лиственных пород, или эту же гречишную лузгу в измельчённом виде.

В зависимости от состава добавляемого к лузге влагоудерживающего компонента величина выхода продукции за максимальный период использования

блока не меняется, но меняется динамика этого выхода. Внесение опилок хвойных пород позволяют достоверно быстрее получать урожай первой волны, чем внесение берёзовых опилок или измельчённой лузги.

Для полноты представлений о данном предмете исследований следует рассмотреть, как будет проявляться введение лузги гречихи в состав грибного субстрата на его производственной ценности при разных способах подготовки этого субстрата, а также при изменении наиболее важных параметров закладки грибного блока, в той степени, в которой это допустимо на производстве. Только после этого можно будет определить, в каких конкретных производственных ситуациях использование лузги гречихи в грибных субстратах будет экономически целесообразным.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Зимняков, В.М. Производство грибов в России / В.М. Зимняков, Г.В. Ильина, Д.Ю. Ильин // Сурский вестник. – 2022. – № 1(17). – С. 69-74. – DOI 10.36461/2619-1202_2022_01_014. – EDN: LNKSUK.

2. Лучкина, Е.Е. Биоуголь из лузги гречихи / Е.Е. Лучкина, М.В. Слобожанинова, О.А. Сидоркина // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе: материалы Национальной с международным участием научно-практической конференции студентов, аспирантов, учёных и специалистов, Тюмень, 20-22 декабря 2023 года. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2023. – С. 228-230. – EDN: CJTRAS.

3. Язев, С.Г. Использование лузги гречихи в пищевом производстве / С.Г. Язев // Наука и современность. – 2014. – № 34. – С. 102-105. – EDN: TEVHHB.

4. Подходы к оценке характеристик цвета фитомеланина для использования в качестве альтернативы какао-порошка / Е.Д. Рожнов, М.Н. Школьникова, Е.А. Кадрицкая [и др.] // Вестник КрасГАУ. – 2022. – № 2(179). – С. 209-216. – DOI 10.36718/1819-4036-2022-2-209-216. – EDN: EGALPN.

5. Шаяхметова, Д.М. Рутин лузги гречихи. Синтез эфиров и бромпроизводных кверцетина / Д.М. Шаяхметова, Л.А. Балтина, Э.Р. Каримова // Сборник тезисов участников форума "Наука будущего – наука молодых", Нижний Новгород, 12-14 сентября 2017 года. Том 2. – Нижний Новгород: ООО "Инконсалт К", 2017. – С. 289-290. – EDN: YRMQEP.

6. Самодолова, О.А. Использование лузги гречихи (гранулированной) в очистке городских поверхностных сточных вод / О.А. Самодолова, Д.В. Ульрих, Т.М. Лонзингер // Градостроительство и архитектура. – 2023. – Т. 13, № 1(50). – С. 37-44. – DOI 10.17673/Vestnik.2023.01.05. – EDN: XTQJNS.

7. Семухин, А.С. Обоснование выбора лузги гречихи как основного ингредиента для создания биоразлагаемой упаковки для пищевых продуктов / А.С. Семухин // 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: HVGQKM.

8. Иванов, А.И. Экологические аспекты развития грибоводства в России / А.И. Иванов // Теоретическая и прикладная экология. – 2021. – № 3. – С. 6-12. – DOI 10.25750/1995-4301-2021-3-006-012. – EDN: FJWAAV.

9. Тишенков А.Д. Субстраты для культивирования вешенки. Часть 1. Характеристика субстратов. М.: Школа грибоводства, 1999. – 62 с.

10. Клинцевич, В.Н. Способы использования лузги гречихи посевной / В.Н. Клинцевич, Е.А. Флюрик // Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология. – 2020. – № 1(229). – С. 68-81. – EDN: FDQERP.

11. Патент № 2332005 C2 Российская Федерация, МПК A01G 1/04. Поточная линия для выращивания грибов вешенка, способ выращивания грибов вешенка и субстрат для их выращивания: № 2006135371/12: заявл. 09.10.2006: опубл. 27.08.2008 / С.А. Фролов. – EDN: GGPUZN.

12. Технологические приемы каскадной биоконверсии лузги подсолнечника / С.А. Сашенкова, Г.В. Ильина, Д.Ю. Ильин, А.Р. Дашкина // Нива Поволжья. – 2020. – № 2(55). – С. 52-57. – DOI 10.36461/NP.2020.2.55.009. – EDN: XKROYK.

13. Оптимизация состава лигноцеллюлозного субстрата на основе торфа и соломы для выращивания грибов Pleurotus ostreatus / В.В. Леонов, С.П. Пронтишева, И.А. Булатов [и др.] // Химия растительного сырья. – 2019. – № 2. – С. 225-230. – DOI 10.14258/jcprm.2019024258. – EDN: MXYHRP.

14. Врублевская, В.И. Обоснование механизма взаимодействия компонентов древесины с влагой / В.И. Врублевская, В.О. Матусевич, В.В. Кузнецова // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2017. – № 3(357). – С. 152-163. – DOI 10.17238/issn0536-1036.2017.3.152. – EDN: YMZLLB.

15. Крамаренко, М.В. Влияние внесения питательной добавки на продуктивность блоков вешенки обыкновенной (Pleurotus ostreatus) / М.В. Крамаренко // Актуальные вопросы агроинженерных и агрономических наук: Материалы национальной научной конференции Института агроинженерии, Института агроэкологии, Челябинск-Миасское, 04-06 марта 2020 года / Под редакцией С.А. Гриценко. – Челябинск-Миасское: Южно-Уральский государственный аграрный университет, 2020. – С. 245-249. – EDN: VRTOGE.

16. Морозов А.И. Вешенка. Шампиньон. Сиитаке. Выращивание, переработка, применение. – Донецк: ООО «Агентство Мультипресс», 2011. – 288 с.

17. Анненков, Б.Г. Оптимизация и использование в ДФО России европейской полустерильной технологии культивирования вешенки обыкновенной / Б.Г. Анненков, В.А. Азарова // Достижения науки и техники АПК. – 2010. – № 6. – С. 40-43. – EDN: MSRJKX.

*Статья поступила в редакцию 04.04.2024*
*Статья принята к публикации 17.06.2024*

УДК 663.433
EDN: LGJOFQ

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СОЛОДОРАЩЕНИЯ ПРОСА ПОСЕВНОГО (*PANICUM MILIACEUM L.*)

© Автор(ы) 2024

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)*

**Аннотация.** Просо посевное (*Panicum miliaceum L.*) представляет определенный интерес, как злаковая культура, способная выращиваться и давать стабильные урожаи даже в неблагоприятных условиях. Белковая фракция проса практически лишена глютена, что позволяет использовать его в производстве безглютеновых продуктов питания. При этом содержание ряда антипитательных веществ, затрудняющих усвоение в организме человека минеральных веществ, можно снизить за счет солодоращения, когда часть полифенольных веществ и фитиновой кислоты в составе зерна переходит в замочные воды. Экспериментально определены условия замачивания и проращивания зерна проса. Доказано, что повышение температуры замочной воды с 15 до 35°С позволяет сократить время замачивания 3,1 раза (с 28 до 9 ч), однако при этом увеличиваются потери при замачивании в 2 раза и увеличиваются риск развития посторонней микрофлоры на поверхности зерна проса. Высокие температуры солодоращения (выше 20°С) приводят к возрастанию метаболических и вегетативных потерь, обуславливая общие потери при замачивании и солодоращении на уровне 27,0-42,4%, что снижает экономическую эффективность производства просяного солода. При температурах солодоращения от 15 до 20°С можно получить свежий солод с максимальным накоплением $\alpha$-амилазной активности 240-280 ед./г при продолжительности солодоращения не менее 5 суток. Полученные в настоящем исследовании результаты показывают перспективность использования проса посевного в качестве сырьевого источника для получения пивоваренных солодов, в том числе отличающихся оригинальными свойствами и позволяющие увеличить ассортимент готовой продукции.

**Ключевые слова**: просо обыкновенное, просяной солод, замачивание, солодоращение, потери при замачивании, потери при солодоращении, $\alpha$-амилазная активность

# RESEARCH OF THE MALTING PROCESS OF MILLET (*PANICUM MILIACEUM L.*)

© The Author(s) 2024

**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)*

**Abstract.** Millet (*Panicum miliaceum L.*) is of particular interest as a cereal crop that can be grown and produce stable yields even in unfavorable conditions. The protein fraction of millet is practically gluten-free, which allows it to be used in the production of gluten-free food products. At the same time, the content of a number of anti-nutrients that impede the absorption of mineral substances in the human body can be reduced through malting, when part of the polyphenolic substances and phytic acid in the grain composition passes into steep water. The conditions for soaking and germination of millet grains were experimentally determined. It has been proven that increasing the temperature of the soaking water from 15 to 35°C can reduce the soaking time from 28 to 9 hours, however, this increases losses during soaking by 2 times and increases the risk of the development of foreign microflora on the surface of the grain millet. High malting temperatures (above 20°C) lead to an increase in metabolic and vegetative losses, causing total losses

during soaking and malting at the level of 27.0-42.4%, which reduces the economic efficiency of millet malt production. At malting temperatures from 15 to 20°C, it is possible to obtain freshly sprouted malt with a maximum accumulation of α-amylase activity of 240-280 units/g with a malting duration of at least 5 days. The results obtained in this study show the prospects of using millet as a raw material source for the production of brewing malts, including those distinguished by original properties and allowing to increase the range of finished products.

**Key words**: millet, millet malt, soaking, malting, losses during soaking, losses during malting, α-amylase activity.

***Для цитирования:*** *Рожнов Е.Д. Исследование процесса солодоращения проса посевного (Panicum miliaceum L.) / Е.Д. Рожнов, М.Н. Школьникова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 2(66). – С. 81-85. – EDN: LGJOFQ.*

**Введение.** Просо посевное (просо обыкновенное, *Panicum miliaceum L.*) представляет собой мелкозернистый однолетний злак, хорошо приспособленный к выращиванию на бедных питательными элементами почвах за счет высоких адаптогенных свойств растения [1]. Просо выращивается повсеместно во всем мире, однако лидерами в выращивании этой злаковой культуры являются Индия, Нигерия, Китай и еще целый ряд африканских государств. По некоторым источникам посевные площади проса в России в 2023 году составляли порядка 300 тыс. га [2].

Рассматривая химический состав проса и его ценность для питания человека можно выделить следующие его особенности. Во-первых, белки проса являются хорошим источником незаменимых аминокислот [3]. В тоже время, в белке проса посевного содержится незначительное количество глютенина и глиадина [4, 5], которые, как известно, участвуют в развитии целиакии [6, 7]. Тот факт, что в зерне проса практически не содержатся глютенин и глиадин делает это сырье привлекательным для создания безглютеновых продуктов питания [8-10].

Кроме того, в эндосперме проса содержится большое количество крахмала (58,1-77,9% от общей массы зерна) [11], клетчатки и пищевых волокон [12], минеральных веществ и веществ, проявляющих антиоксидантные свойства [13]. Просо содержит в своем составе ряд фенольных веществ [14], которые при употреблении этого злака в пищу способствуют уменьшению окислительного стресса [15], проявляют антигипертензивные свойства [16], а также способствуют снижению гликемического индекса [17].

Рядом исследователей отмечается, что наличие большого количества антипитательных веществ в зерне проса (таннины, фитиновая кислота, некоторые полифенолы), способных связывать в том числе и минеральные вещества зерна снижает их усвояемость в организме человека [18, 19]. Солодоращение можно рассматривать как общий способ для снижения антипитательных веществ в зерне различных злаков, как это показано, например, для сорго [21], маша [22] и ряда других злаков [23].

Таким образом целью настоящего исследования было изучить процесс солодоращения зерна проса посевного *Panicum miliaceum L.* и определить ключевые аспекты замачивания и проращивания для последующей разработки технологического решения для производства просяного солода.

**Методология.** В качестве объекта исследования использовали просо посевное сорта Барнаульское 18. Сорт относится к среднеспелым и характеризуется высокой засухоустойчивостью, а также высокими технологическими качествами для выработки зерна и круп.

Зерно проса перед замачиванием сортировали и использованием сит размером 3,0; 2,5 и 2,0 мм для удаления зерен других злаков, не зерновой и сорной примеси с использованием универсального лабораторного рассева УРЛ-1. Сортированное зерно промывали водопроводной водой, удаляли легкий сплав. Замачивание зерна проводили при температурах 15-35°С в течение 48 часов. Проращивание зерна осуществляли при 15-35°С по методу статической солодовни с перемешиванием и увлажнением солода каждые 6-8 часов.

Определение крахмала в зерне проводили по ГОСТ 10845-98 Зерно и продукты его переработки. Метод определения крахмала. Определение влажности зерна проводили по ГОСТ 13586.5-2015 Зерно. Метод определения влажности. Белок определяли методом Къельдаля в соответствии с ГОСТ 10846-91 Зерно и продукты его переработки. Метод определения белка. Жир определяли в соответствии с ГОСТ 29033-91 Зерно и продукты его переработки. Метод определения жира. Зольность проса определяли основным методом без применения ускорителей в соответствии с ГОСТ 10847-2019 Зерно. Методы определения зольности. Содержание иных компонентов (клетчатка и другие балластные вещества зерна проса) определяли алгебраически. Определение α-амилазной активности зерна проса при проращивании определяли колориметрически в соответствии с ГОСТ Р 51228-98 (ИСО 3983-77) Зерно и зерновые продукты. Колориметрический метод определения активности альфа-амилазы.

Потери при замачивании рассчитывали по формуле (1):

$$Потери\ при\ замачивании = (M_1 - M_2) / M_1 \times 100\% \quad (1)$$

где $M_1$ – масса сухих веществ зерна до замачивания, г; $M_2$ – масса сухих веществ зерна после замачивания, г.

Метаболические потери (потери на дыхание зерна при солодоращении) рассчитывали по формуле (2):

$$Метаболические\ потери = (M_1 - M_3) / M_1 \times 100\% \quad (2)$$

где $M_3$ – масса сухих веществ пророщенного зерна, г.

Вегетативные потери (потери на проращивание) рассчитывали по формуле (2):

$$Вегетативные\ потери = M_4 / M_5 \times 100\% \quad (3)$$

где $M_4$ – масса сухих веществ вегетативной части пророщенного зерна (ростки, корешки), г; $M_5$ – масса сухих веществ пророщенного зерна без вегетативной части, г.

**Результаты.** На первом этапе исследований просо подвергали химическому анализу (рис. 1).

В ходе исследований было установлено, что по содержанию крахмала просо практически идентично таким видам традиционных культур для солодоращения как пшеница и рожь. В то же время исследуемый образец проса является низкобелковистым сырьем, что делает его перспективным сырьем для пивоварения, поскольку одной из проблем в производстве пива является чрезмерный переход белковых фракций из сырья в сусло, что может приводить к проблемам со стабильностью напитка при хранении. К недостаткам проса можно отнести высокое содержание жира, поскольку в результате ферментативного действия липоксигеназ могут возникать альдегиды и пероксиды, обладающие низким порогом обнаружения органами обоняния и участвующие в формировании так называемого «засвеченного» привкуса пива.

Перед солодоращением зерно проса сортировали, удаляя из него сорную примесь, зерна других культур и злаков, а также суховейные зерна, поскольку наличие этих примесей негативно сказывается на одном из важнейших технологических показателей солода – экстрактивности.

Замачивание проса в воде проводили в статическом режиме без добавления стимуляторов солодоращения.

В ходе замачивания варьировалась температура замачивания и его продолжительность (рис. 2). В ходе предварительных испытаний было установлено, что наилучшая прорастаемость наблюдалась у зерен проса с влажностью 40-43%.

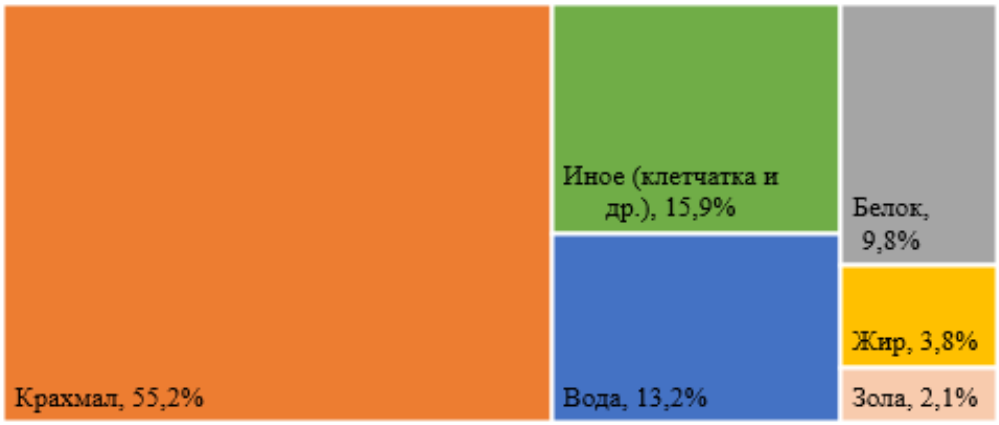



*Рисунок 1 – Фитохимический состав зерна проса (определен авторами экспериментально)*

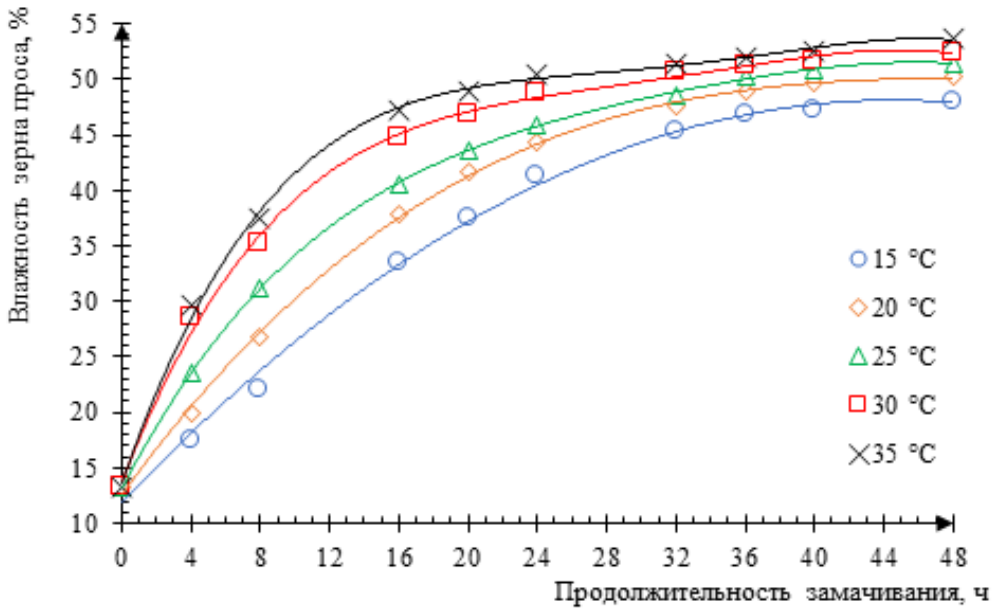



*Рисунок 2 – Влияние температуры и продолжительности замачивания на содержание влаги в зерне проса*

**Обсуждение.** На основании проведенного эксперимента можно сделать вывод о том, что для достижения необходимой влажности зерна проса для прорастания в зависимости от температуры воды необходимо от 9 до 28 часов. Однако, необходимо учитывать, что слишком длительный процесс замачивания может привести к ингибированию процесса роста зародыша, и как следствие к снижению качества солода. Высокие температуры проращивания в тоже время будут способствовать развитию микробиоты на поверхности зерна, что может привести к плесневению молодого солода при дальнейшем проращивании.

Солодорашение замоченного зерна проса осуществляли в ящиках при температуре 15-35°С, контролируя метаболические потери на дыхание и вегетативные потери, связанные с образованием ростков (табл. 1).

Было установлено, что суммарные потери сухого вещества семян просо при солодоращении увеличиваются со временем и температурой проращивания. Так, при проращивании зерна проса при 35°С в течение 2 суток масса 1000 зерен уменьшалась с 8,2 г до 6,23 г, а при проращивании в течение 4 суток масса 1000 зерен уменьшалась до 4,59 г.

Потери зерна проса при проращивании складываются из потерь при замачивании (которые увеличиваются пропорционально увеличению температуры замачивания), метаболических потерь, связанных с дыханием зерна при проращивании, и протеканием метаболических реакций в клетке, а также вегетативных потерь, связанных с ростом листка и корешков. Метаболические и вегетативные потери увеличиваются с повышением температуры и продолжительности проращивания. Можно видеть, что при длительном проращивании при низких температурах (15 и 20°С) метаболические потери выше вегетативных, что объясняется замедлением роста веге-тативных частей зерна при низких температурах. Увеличение температуры проращивания стимулирует росткообразование и прирост корешков, что в значительной степени увеличивает сопутствующие вегетативные потери.

Таким образом, наиболее подходящей температурой проращивания просяного солода с точки зрения сокращения общих потерь при солодоращении можно считать температуру 20°С.

На следующем этапе исследований изучали накопление *α*-амилазы в процессе проращивания зерна проса.

Экспериментальные результаты представлены на рисунке 3.

*Таблица 1 – Влияние температуры проращивания на потери при солодоращении (n=3)*

| Температура солодоращения,°С | Масса 1000 зерен, г | | Потери при замачивании,% | Потери при солодоращении,% масс. | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | на 2-е сутки проращивания | | | на 4-е сутки проращивания | | |
| | на 2-е сутки проращивания | на 4-е сутки проращивания | | метаболические | вегетативные | общие | метаболические | вегетативные | общие |
| 15 | 7,54 | 6,88 | 1,1 | 2,1 | 0,9 | 4,1 | 4,0 | 1,8 | 6,9 |
| 20 | 7,21 | 6,59 | 1,3 | 3,7 | 2,1 | 7,1 | 8,2 | 7,6 | 17,1 |
| 25 | 6,89 | 5,58 | 1,7 | 4,9 | 4,6 | 11,2 | 11,8 | 13,5 | 27,0 |
| 30 | 6,56 | 4,92 | 2,0 | 7,2 | 6,7 | 15,9 | 14,2 | 19,2 | 35,4 |
| 35 | 6,23 | 4,59 | 2,2 | 9,6 | 9,9 | 21,7 | 17,6 | 22,6 | 42,4 |

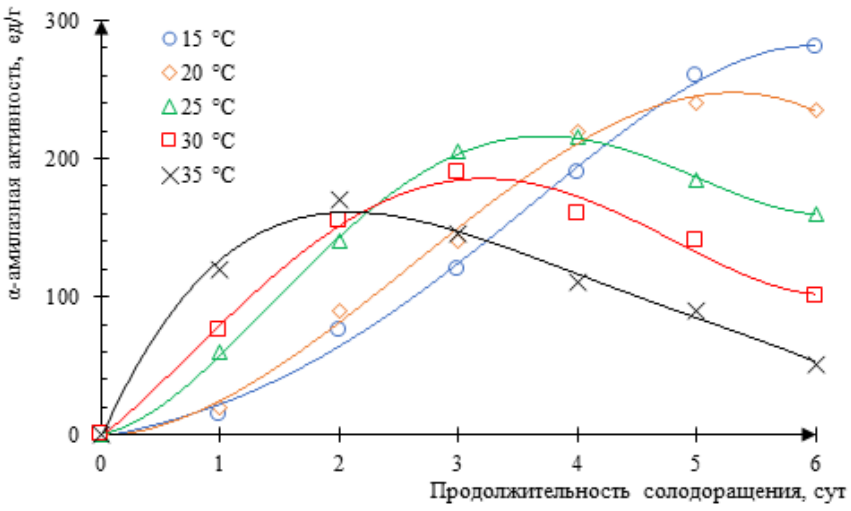



*Рисунок 3 – Влияние продолжительности и температуры проращивания на α-амилазную активность просяного солода*

В ходе выполненных исследований установлено, что при низких температурах солодоращения (15 и 20°С) прирост *α*-амилазной активности незначительный, однако в дальнейшем активность постепенно увеличивается и достигает максимума к 5-6 суткам проращивания. Высокие температуры солодоращения способствуют получению более высоких значений *α*-амилазной активности в первые сутки проращивания, однако в дальнейшем прирост активности замедляется и начинает падать. Таким образом, для получения просяного солода с максимальной ферментативной активностью необходимо осуществлять проращивание при температурах 15-20°С.

**Выводы.** Таким образом, по результатам выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

1) экспериментально установлено, что температура замачивания зерна просо в значительной мере влияет на длительность этого процесса. Так, повышение температуры замочной воды с 15 до 35°С позволяет сократить время замачивания 3,1 раза (с 28 до 9 часов), однако при этом увеличиваются потери при замачивании в 2 раза и повышается риск развития посторонней микрофлоры на поверхности зерна проса;

2) доказано, что высокие температуры солодоращения (выше 20°С) приводят к возрастанию метаболических и вегетативных потерь, обуславливая общие потери при замачивании и солодоращении на уровне 27,0-42,4%, что является негативным фактором с точки зрения эффективности производства;

3) показано, что при температурах солодоращения от 15 до 20°С можно получить свежепроросший солод с максимальным накоплением α-амилазной активности (на уровне 240-280 ед./г) при продолжительности солодоращения не менее 5 суток.

Полученные в настоящем исследовании результаты показывают перспективность использования проса посевного в качестве сырьевого источника для получения солода в спиртовом производстве (что в настоящее время является отработанной технологией), но и для получения пивоваренных солодов, отличающихся оригинальными свойствами и позволяющие увеличить ассортимент готовой продукции.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Santra D.K., Khound R., Das S. Proso millet (Panicum miliaceum L.) breeding: Progress, challenges and oppor-tunities // Advances in Plant Breeding Strategies: Cereals: Vol 5. – 2019. – P. 223-257.

2. https://www.agroinvestor.ru/analytics/article/41417-vozvrashchenie-prosa-sposobna-li-drevnyaya-zernovaya-kultura-sostavit-konkurentsiyu-pshenitse/

3. Wiedemair V. et al. Amino Acid Profiles and Compositions of Different Cultivars of Panicum miliaceum L //Chromatographia. – 2020. – Vol. 83. – P. 829-837.

4. Virdi A.S., Singh N. Functional Cereals for Gluten Intolerance //Functional Cereals and Cereal Foods: Proper-ties, Functionality and Applications. – Cham: Springer International Publishing, 2022. – P. 81-112.

5. Pandey S. Nutritional aspects and health implications of gluten-free products //Challenges and Potential Solu-tions in Gluten Free Product Development. – 2022. – P. 17-34.

6. Niro S. et al. Gluten-free alternative grains: Nutritional evaluation and bioactive compounds //Foods. – 2019. – Vol. 8. – №. 6. – Article ID: 208.

7. Ratnavathi C.V., Tonapi V.A. Nutritional properties of millets: nutricereals with health benefits to reduce life-style diseases and malnutrition //Handbook of Millets-Processing, Quality, and Nutrition Status. – Singapore: Springer Nature Singapore, 2022. – P. 129-149.

8. Kumar S.R. et al. Formulation of nutritional and ready to mix gluten-free porridge from proso millet (Panicum miliaceum) little millet (Panicum sumatrense) and legume faba bean (Vicia faba) //Journal of Food Science and Tech-nology. – 2022. – Vol. 59. – P. 2821-2829.

9. Tomić J., Torbica A., Belović M. Effect of non-gluten proteins and transglutaminase on dough rheological properties and quality of bread based on millet (Panicum miliaceum) flour //Lwt. – 2020. – Vol. 118. – Article ID: 108852.

10. McSweeney M.B. et al. Chemical and physical characteristics of proso millet (Panicum miliaceum) - based products // Cereal Chemistry. – 2017. – Vol. 94. – №. 2. – P. 357-362.

11. Li K. et al. Diversity analysis of starch physicochemical properties in 95 proso millet (Panicum miliaceum L.) accessions // Food chemistry. – 2020. – Vol. 324. – Article ID: 126863.

12. Kurek M.A. et al. Physicochemical properties of dietary fibers extracted from gluten-free sources: quinoa (Chenopodium quinoa), amaranth (Amaranthus caudatus) and millet (Panicum miliaceum) //Food Hydrocolloids. – 2018. – Vol. 85. – P. 321-330.

13. Agarwal S., Chauhan E.S. The Nutritional Composition, various processing and health benefits of Proso Mil-let: A Review //Research Journal of Pharmacy and Technology. – 2019. – Vol. 12. – №. 8. – P. 4013-4017.

14. Balli D. et al. Proso Millet (Panicum miliaceum L.) as Alternative Source of Starch and Phenolic Compounds: A Study on Twenty-Five Worldwide Accessions //Molecules. – 2023. – Vol. 28. – №. 17. – P. 6339.

15. Mir R.A., Somasundaram R., Panneerselvam R. Changes in antioxidant enzymes activities mitigates deleteri-ous effects of ROS in Panicum miliaceum (L.) under drought stress //Journal of Stress Physiology & Biochemistry. – 2019. – Vol. 15. – №. 3. – P. 81-91.

16. Jhan F. et al. Fabrication of protein crocin nanocomplex and its addition in proso millet flour for development of functional snacks with anti-diabetic, anti-hypertensive and antioxidant properties // International Journal of Food Science & Technology. – 2023. – Vol. 58. – №. 8. – P. 4196-4204.

17. Rajasekaran R., Francis N. Genetic and genomic resources for improving proso millet (Panicum miliaceum L.): a potential crop for food and nutritional security //The Nucleus. – 2021. – Vol. 64. – №. 1. – P. 21-32.

18. Samtiya M. et al. Key anti-nutrients of millet and their reduction strategies: an overview //Act. Sci. Nutr. Health. – 2021. – Vol. 5. – №. 12. – P. 68-80.

19. Arya C. Effect of processing on antioxidant potential and antinutritional factors in small millets //Small Millet Grains: The Superfoods in Human Diet. – Singapore: Springer Nature Singapore, 2022. – P. 79-93.

20. Ojha P. et al. Malting and fermentation effects on antinutritional components and functional characteristics of sorghum flour //Food science & nutrition. – 2018. – Vol. 6. – №. 1. – P. 47-53.

22. Onwurafor E.U. et al. Effect of malting periods on the nutrient composition, antinutrient content and pasting properties of mungbean flour //Agro-Science. – 2020. – Vol. 19. – №. 1. – P. 18-24.

23. Gautam L., Gupta A. Impact of malting on nutrient and Antinutrient content of processed composite flour prepared with different grains //Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry. – 2018. – Vol. 7. – №. 4. – P. 2934-2937.

*Статья поступила в редакцию 10.03.2024*
*Статья принята к публикации 17.06.2024*

УДК 637.04
EDN: JQRJZW

# ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА МЯСНОГО ХЛЕБА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОДНОГО ЭКСТРАКТА БРУСНИКИ

© Автор(ы) 2024

SPIN: 8527-9553
AuthorID: 1182170
ORCID: 0009-0002-8546-4199

**ТАБАКАЕВА Оксана Вацлавовна,** доктор технических наук, доцент,
профессор базовой кафедры пищевой и клеточной инженерии ПИШ
*Дальневосточный федеральный университет*
*(690920, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, Кампус ДВФУ, корп. М, e-mail: tabakaeva.ov@dvfu.ru)*
ORCID: 0000-0002-7068-911X

**ГВОЗДЮКОВА Лариса Алексеевна,** аспирант
*Дальневосточный федеральный университет*
*(690920, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, Кампус ДВФУ, корп. М, e-mail: gvozdyukova.la@dvfu.ru)*

**Аннотация.** Цель исследования – изучить влияние водного экстракта брусники на органолептические и физико-химические показатели мясного хлеба из мяса индейки. Задачи – подобрать оптимальную массовую долю водного экстракта, вводимого в рецептуру мясного хлеба, изготовить экспериментальные образцы мясного хлеба с использованием водного экстракта брусники, определить органолептические и физико-химические показатели мясного хлеба с использованием водного экстракта брусники. Объекты исследования –экспериментальные образцы мясного хлеба с различной процентной заменой воды на водный экстракт брусники. Схема эксперимента по процентной замене воды на водный экстракт брусники: контроль, мясной хлеб, полученный по традиционной рецептуре; № 1 – 50%, № 2 – 75%, № 3 – 100%. Разработана рецептура и технология мясного хлеба с использованием водного экстракта брусники. Органолептическая оценка образцов мясного хлеба показала, что образец № 1, с заменой воды 50% водного экстракта брусники, не имел значительных отличий от контрольного образца; образец № 2, в котором 75% замена воды на водный экстракт брусники, имеет самый высокий итоговый балл. Добавление экстракта в состав мясного фарша влияет на консистенцию, вкус и запах продукта: готовое изделие приобретает более интенсивный и равномерный розовый цвет, характерный запах, структура более однородная, плотная. Увеличение содержания водного экстракта (образец № 3 – 100%) приводит к изменению цвета продукта. На разрезе мясной хлеб имеет нехарактерный для мясного изделия оттенок, что ухудшает показатели внешнего вида готового продукта. Проведенный эксперимент дает положительную оценку для проведения дальнейших исследований и тестирования образцов мясного хлеба с использованием водного экстракта брусники.

**Ключевые слова:** мясо, мясной продукт, мясной хлеб, мясо индейки, экстракт, экстрагирование, ягода, брусника, органолептические показатели, срок годности.

# TECHNOLOGY FOR THE PRODUCTION OF MEAT LOAVES USING LINGONBERRY AQUEOUS EXTRACT

© The Author(s) 2024

**TABAKAEVA Oksana Vatslavovna,** doctor of technical Sciences, associate professor
professor Basic Department of Food and Cell Engineering NSP
*Far Eastern federal university*
*(690920, Vladivostok, Russian island, Ajax, FEFU Campus, building. M, e-mail: tabakaeva.ov@dvfu.ru)*

**GVOZDYUKOVA Larisa Alekseevna,** post-graduate student
*Far Eastern federal university*
*(690920, Vladivostok, Russian island, Ajax, FEFU Campus, building. M, e-mail: gvozdyukova.la@dvfu.ru)*

**Abstract.** The purpose of the study is to study the effect of lingonberry aqueous extract on the organoleptic and physicochemical parameters of meat loaves made from turkey meat. Objectives: to select the optimal mass fraction of aqueous extract introduced into the recipe for meat loaves, to produce experimental samples of meat loaves using an aqueous extract of lingonberries, to determine the organoleptic and physicochemical characteristics of meat loaves using an aqueous extract of lingonberries. The objects of the study were experimental samples of meat loaves with different percentage replacement of water with lingonberry aqueous extract. Scheme of the experiment on the percentage replacement of water with an aqueous extract of lingonberries: control, meat loaves obtained according to a traditional recipe; № 1 – 50%, № 2 – 75%, № 3 – 100%. A recipe and technology for meat loaves using an aqueous extract of lingonberries has been developed. Organoleptic evaluation of meat loaf samples showed that sample № 1, with water replaced by 50% lingonberry aqueous extract, did not have significant differences from the control sample; sample № 2, in which 75% replacement of water with aqueous lingonberry extract, has the highest final score. Adding extract to minced meat affects the consistency, taste and smell of the product. The finished product acquires a more intense and uniform pink color, a

characteristic odor, and a more uniform and dense structure. An increase in the content of the aqueous extract (sample № 3 – 100%) leads to a change in the color of the product. When cut, meat loaf has a shade uncharacteristic for a meat product, which worsens the appearance of the finished product. The experiment conducted gives a positive assessment for further research and testing of meat loaf samples using an aqueous extract of lingonberries.

**Keywords:** meat, meat product, meat bread, turkey meat, extract, extraction, berry, lingonberry, organoleptic characteristics, shelf life.

***Для цитирования:*** *Табакаева О.В. Технология производства мясного хлеба с использованием водного экстракта брусники / О.В. Табакаева, Л.А. Гвоздюкова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 2(66). – С. 86-91. – EDN: JQRJZW.*

**Введение.** Благодаря своей пищевой и биологической ценности рацион питания современного человека включает мясо и мясные продукты. Необходимость моделирования сформировавшейся ассортиментной политики связана с трансформацией мясной промышленности, что в свою очередь влечет принципиальные изменения в структуре ассортимента продуктов. Одним из направлений для расширения ассортимента мясных продуктов является поиск и внедрение в рецептуру дополнительного сырья, которое обогащает состав или способствует улучшению качества продукта.

На рынке мясной продукции среди ассортимента колбасных изделий можно встретить мясной хлеб. Данный продукт рационально использовать в качестве объекта обогащения, введения в его состав различных видов сырья, витаминов, добавок [1]. Мясной хлеб (колбасный хлеб, леберкезе) производится путем запекания мясного фарша без оболочки в форме при высокой температуре [2, 3]. При производстве мясного хлеба зачастую используется такое сырье, как свинина, говядина или их сочетание, но актуальным направлением расширения ассортимента является внедрение нового вида сырья в традиционные рецептуры колбасных изделий. В качестве такого сырья можно использовать мясо индейки [4].

Мясо индейки и продукты из мяса индейки имеют большой спрос на рынке мясных изделий за счет своего состава (комплекс витаминов, фолиевая кислота, селен, калий, магний, железо, натрий, фосфор), низкого содержания жира и относительно большого количества функционального белка. Индейка является низкоаллергенным продуктом, который можно употреблять в пищу всем группам населения, в том числе и при диетическом питании [5-10]. Исходя из этого, мясо индейки является перспективным сырьем для производства мясных продуктов, особенно мясного хлеба.

Кроме замены основного сырья актуальным является введение в рецептуру колбасных продуктов дополнительного растительного сырья. Несмотря на значительные разработки мясных продуктов с использованием в технологии различных ягод, применение ягодных экстрактов в мясной промышленности недостаточно изучено. На сегодняшний момент на рынке колбасных изделий существует несколько производителей, которые реализуют мясные изделия с использованием в технологии целых или измельченных ягод брусники [11-13].

Помимо основных питательных веществ, брусника содержит комплекс различных витаминов, кальций, магний, натрий, калий, фосфор, железо и марганец. Органические кислоты, особенно бензойная, обладают антисептическими свойствами и защищают ягоды от плесени. Также брусника является низкокалорийной ягодой, способствует усвоению белка и является ценным источником фенолов и полифенолов, благодаря которым обладает антиоксидантными, антиокислительными и антибактериальными свойствами [14-18].

Эти свойства позволяют рассмотреть возможность использования брусничного экстракта в производстве мясных продуктов, в частности, мясных хлебов, как возможность снижения массовой доли используемого нитрита натрия, а также замедлить процесс окисления липидов, что позволит увеличить срок годности готового продукта. Исходя из этого использование водного экстракта брусники в технологии производства мясного хлеба из мяса индейки является актуальной.

Таким образом цель исследования – изучение влияния водного экстракта брусники на органолептические и физикохимические показатели мясного хлеба из мяса индейки.

**Методология.** Объект исследования – мясной хлеб с процентной заменой воды на водный экстракт брусники – 50, 75, 100%.

При исследовании рассматривались такие показатели, как:

– органолептические: внешний вид, консистенция, цвет и вид на разрезе, запах и вкус, форма. Данные показатели оцениваются по 5-балльной системе [19];

– физико-химические: массовая доля жира определялась экстракционным аппаратом Сокслета, массовая доля белка – по методу Кьельдаля, массовая доля влаги – по стандартному методу высушивания, массовая доля хлористого натрия (поваренной соли) определялась методом Мора [20-22];

− микробиологические: КМАФАнМ, КОЕ/г, БГКП (колиформы), сульфитредуцирующие клостридии, *S. aureus*, патогенные, в т.ч. сальмонеллы, *Listeria monocytogenes* [24-27];

− экологические: свинец, мышьяк, кадмий, ртуть, пестициды (ГХЦГ (*α-,β-,γ*-изомеры), ДДТ и его метаболиты), радионуклиды (цезий-137, стронций-90) [28-33].

**Результаты.** При разработке технологии производства водного экстракта брусники было учтено, что повышение температуры ускоряет процесс экстракции, что может негативно сказаться на ценных веществах, содержащихся в экстракте, вследствие этого было исследовано влияние температуры на выход сухих веществ (табл. 1) [34].

Анализируя данные таблицы большее содержание сухих веществ наблюдается при температуре экстрагирования 45°С и продолжительности 60-150 минут.

С учетом полученных данных была разработана технология производства водного экстракта брусники, которая представлена на рисунке 1.

*Таблица 1 – Зависимость содержания сухих веществ от температуры и времени экстрагирования*

| Время экстрагирования, мин | Температура экстрагирования,°С | | |
|---|---|---|---|
| | 30 | 45 | 60 |
| 30 | 0,3 | 0,5 | 0,4 |
| 60 | 0,5 | 0,6 | 0,5 |
| 90 | 0,7 | 1,0 | 0,8 |
| 120 | 0,7 | 1,0 | 0,8 |
| 150 | 0,7 | 1,0 | 0,8 |

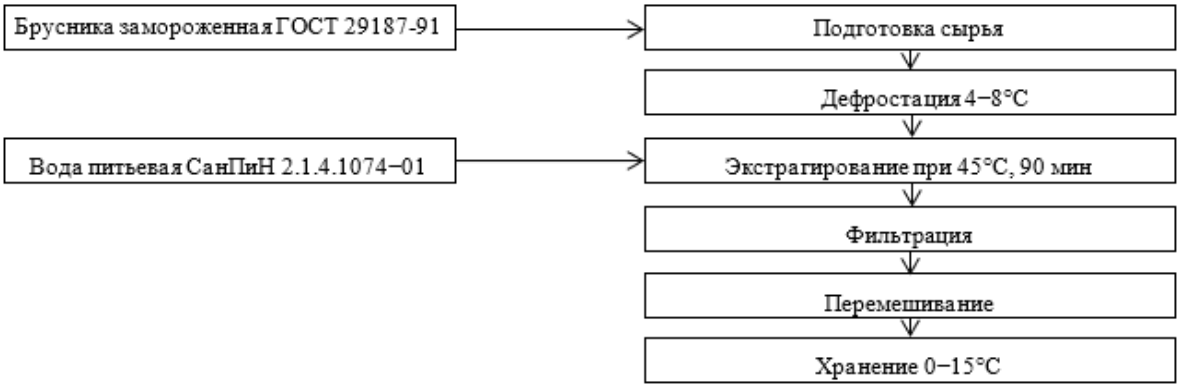



*Рисунок 1 – Технологическая схема получения водного экстракта из замороженной брусники*

Технология производства мясного хлеба с использованием водного брусничного экстракта является стандартной и включает этапы: подготовка сырья, измельчение сырья (8-12 мм), посол сырья (внесение специй, соли, нитритно-солевой смеси и воды) в течение 6-24 часов при температуре 0-4°С, изготовление фарша с помощью куттера – 6-12 минут, формовка, выпечка в течение 150 минут, 140-160°С, освобождение от форм, выдержка 30 минут, 130-150°С, охлаждение до 4°С, контроль качества, упаковка, хранение, но отличается внесением на стадии посола водного экстракта брусники вместо воды [35].

**Обсуждение.** Получены модельные системы с различной процентной заменой воды на водный экстракт брусники, в качестве основной рецептуры выбрана рецептура мясного хлеба «Любительский» (табл. 2) [36].

В таблице 2 показана рецептура контрольного образца – мясной хлеб, полученный по традиционной рецептуре, без использования водного экстракта брусники, и модельных систем, в которых вода заменяется на водный экстракт брусники (№ 1 – 50%, № 2 – 75%, № 3 – 100%), при этом снижается массовая доля нитритно-посолочной смеси.

Первично оценивались сенсорные параметры (экспериментальные образцы сравнивались с контрольным образцом). В оценке участвовали экспериментальные образцы мясного хлеба из мяса индейки с процентной заменой воды на водный экстракт брусники (№ 1 – 50%, № 2 – 75%, № 3 – 100%) (табл. 3) [37].

*Таблица 2 – Рецептура мясного хлеба из мяса индейки,%*

| Сырье | Контроль | № 1 | № 2 | № 3 |
|---|---|---|---|---|
| Мясо индейки | 82 | 82 | 82 | 82 |
| Шпик | 9 | 9 | 9 | 9 |
| Вода | 6,6 | 3,4 | 2 | 0 |
| Водный экстракт брусники | 0 | 3,4 | 5 | 7,2 |
| Нитритно-посолочная смесь | 2 | 1,8 | 1,6 | 1,4 |
| Сахар | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 |
| Перец черный | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 |
| Мускатных орех | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 |

*Таблица 3 – Органолептическая оценка модельных систем мясного хлеба по 5-балльной системе*

| Показатель | Контроль | № 1 | № 2 | № 3 |
|---|---|---|---|---|
| Внешний вид | 4 | 4 | 5 | 4 |
| Консистенция | 4 | 4 | 4 | 3 |
| Цвет и вид на разрезе | 4 | 5 | 5 | 4 |
| Запах и вкус | 5 | 4 | 4 | 4 |
| Форма | 5 | 4 | 5 | 4 |
| Сумма | 22 | 21 | 23 | 19 |

Органолептическая оценка модельных систем мясного хлеба из мяса индейки с процентной заменой воды на водный экстракт брусники показала, что № 2 (75% экстракта) имеет показатели наиболее соответствующие заданным, отличается лучшим вкусом и ароматом, структурой и консистенцией, цветом и внешним видом. Модельные системы с заменой воды на 50 и 100% водного экстракта брусники имели нарушенную форму и рыхлую консистенцию, цвет модельной системы № 3 имеет посторонний оттенок, что ухудшает показатели внешнего вида готового продукта.

Таблица 4 представляет сравнительный анализ сенсорных параметров исследуемого образца № 2 (75% экстракт) и контрольного образца.

Согласно полученным данным, показатели соответствуют нормам, указанным в ГОСТ 23670-2019 «Изделия колбасные вареные мясные», оба образца имеют сухую, чистую, гладкую, равномерно обжаренную поверхность. Исследуемый образец (№ 2) имеет упругую консистенцию. Цвет фарша исследуемой модельной системы светло-розовый, что связано с использованием водного экстракта брусники. Можно сделать вывод, что применение данного компонента позволяет улучшить цвет готового изделия, делая его более привлекательным для потребителя.

Результаты физико-химической оценки мясного хлеба с использованием водного экстракта брусники указаны в таблице 5.

Физико-химические показатели опытного образец соответствуют требованиям ГОСТ 23670-2019 «Изделия колбасные вареные мясные».

Изучены микробиологические и экологические характеристики опытного образца мясного хлеба, которые регламентируются ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции» (табл. 6).

По данным, представленным в таблице, можно сделать вывод, что опытный образец соответствует требованиям нормативной документации.

В соответствии с ГОСТ 23670-2019 рекомендуемый срок годности мясного хлеба (температура воздуха 0-6°С, относительная влажность воздуха не выше 75%) должен составлять 3 суток.

В таблице 7 представлены изменения микробиологических год показателей мясного хлеба с использованием водного экстракта брусники при хранении в течение 3, 4, 5 суток.

Ввиду проведенных исследований и полученных результатов (табл. 7), при рекомендуемых условиях хранения происходит изменение микробиологических показателей, а именно на 5 сутки показатель КМАФАнМ превышал допустимый уровень содержания, что свидетельствует о порче продукта.

*Таблица 4 – Органолептические показатели мясного хлеба с использованием водного экстракта брусники*

| Показатель | Описание показателя | |
|---|---|---|
| | Образец (№ 2) | Контроль |
| Внешний вид | Чистая, гладкая, сухая, равномерно обжаренная поверхность | Чистая, гладкая, сухая, равномерно обжаренная поверхность |
| Консистенция | Упругая | Умеренно упругая |
| Цвет и вид на разрезе | Светло-розовый равномерно перемешан | Бежевый, равномерно перемешан |
| Запах и вкус | Выраженный аромат пряностей без постороннего привкуса и запаха, с легкими нотками брусники, в меру солёный | Выраженный аромат пряностей без постороннего привкуса и запаха, в меру солёный |
| Форма | Изделие прямоугольное | Изделие прямоугольное |

*Таблица 5 – Физико-химические характеристики качества мясного хлеба с использованием водного экстракта брусники*

| Мясной хлеб | Массовая доля белка,%, не менее | Массовая доля жира,%, не более | Массовая доля хлористого натрия,%, не более | Массовая доля нитрита натрия,%, не более |
|---|---|---|---|---|
| Требования ГОСТ | 13,0 | 30,0 | 2,5 | 0,005 |
| Контрольный | 15,0 | 27,7 | 1,5– | 0,004 |
| Опытный | 15,2 | 25,8 | 2,3 | 0,003 |

*Таблица 6 – Показатели микробиологической и экологической безопасности мясного хлеба с использованием водного экстракта брусники*

| Показатель | ТР ТС | Контрольный | Опытный |
|---|---|---|---|
| КМАФАнМ, КОЕ/г, не более | $2,5\times10^3$ | $1,6\times10^3$ | $1,5\times10^3$ |
| БГКП (коли-формы) в 0,1 г | Не доп. | Отс. | Отс. |
| Сульфит-редуцирующие клостридии в 0,01 г | Не доп. | Отс. | Отс. |
| *S. aureus* в 1,0 г | Не доп. | Отс. | Отс. |
| Патогенные, в т.ч. сальмонеллы в 25 г | Не доп. | Отс. | Отс. |
| *Listeria monocytogenes* в 25 г | Не доп. | Отс. | Отс. |
| Токсические элементы, не более | | | |
| Свинец | 0,5 | 0,05 | 0,04 |
| Мышьяк | 0,1 | 0,035 | 0,056 |
| Кадмий | 0,05 | 0,032 | 0,040 |
| Ртуть | 0,03 | 0,016 | 0,021 |
| Пестициды, мг/кг | | | |
| ГХЦГ (α-,β-,γ-изомеры) | 0,1 | 0,05 | 0,05 |
| ДДТ и его метаболиты | 0,1 | 0,010 | 0,015 |
| Радионуклиды, Бк/кг(л) | | | |
| Цезий-137 | 180 | 72 | 74 |
| Стронций-90 | – | – | – |

*Таблица 7 – Изменение микробиологических показателей мясного хлеба с использованием водного экстракта брусники при хранении*

| Показатель | ТР ТС | Опытный | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 3 сут. | 4 сут. | 5 сут. |
| КМАФАнМ, КОЕ/г, не более | $2,5\times10^3$ | $2\times10^3$ | $2,4\times10^3$ | $2,6\times10^3$ |
| БГКП (коли-формы) в 0,1 г | Не доп. | Отс. | Отс. | Отс. |
| Сульфит-редуцирующие клостридии в 0,01 г | Не доп. | Отс. | Отс. | Отс. |
| *S. aureus* в 1,0 г | Не доп. | Отс. | Отс. | Отс. |
| Патогенные, в т.ч. сальмонеллы в 25 г | Не доп. | Отс. | Отс. | Отс. |
| *Listeria monocytogenes* в 25 г | Не доп. | Отс. | Отс. | Отс. |

**Выводы.** Исходя из полученных результатов, полученный по разработанной технологии, мясной хлеб из ямса индейки с использованием водного экстракта брусники, позволяет расширить ассортимент мясных продуктов. Кроме этого, мясной хлеб имел улучшенные органолептические показатели, а именно улучшенный цвет готового изделия, была снижена массовая доля используемой нитритно-посолочной смеси, увеличен срок годности мясного хлеба.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Дубняк Я.В. Разработка технологии производства обогащенного мясного хлеба/ Я.В. Дубняк, А.А. Юферова, И.Н. Лесик. –ТППП АПК. – 2021. – №2

2. Нагибина В.В. Исследование влияния антиокислителей на свойства обогащенных мясного хлеба / В.В. Нагибина – Челябинск: ЮУрГУ, 2016. – 81 с.

3. Айрапетян А.А. Разработка технологии мясного хлеба функционального назначения/ А.А. Айрапетян, В.И. Манжесов. – Вестник ВГУИТ. 2020. – №4 (86).

4. Храмова В.Н. Хлеб колбасный функциональной направленности в питании спортсменов/ В.Н. Храмова, А.М. Пименова. – Известия НВ АУК. 2021. – №2 (62).

5. Некрасов Д.Р. Использование мяса птицы при производстве мясных продуктов/ Д.Р. Некрасов, О.Е. Самсонова. – Курск, 2022. – С. 114-116.

6. Горшков В.В. Эффективность использования разного уровня мяса индейки в фарше приготовлении полуфабрикатов в тесте (пельменей)/ В.В. Горшков, Е.И. Машкина. – Ползуновский вестник. – 2021. – №2.

7. Зимняков В.М. Состояние и перспективы производства мяса индейки/ В.М. Зимняков, Е.Н. Варламова. – Нива Поволжья. 2017. – №4 (45).

8. Хатко Н.Х. Перспективы производства кулинарной продукции из индейки (обзор)/ Н.Х. Хатко, А.С. Широкова. – Новые технологии. – 2022. – № 1.

9. Шлыков С.Н. Мясо индейки как основа мясопродуктов для спортивного питания/ С.Н. Шлыков, Р.С. Омаров. – ТППП АПК. 2023. – №4.

10. Скурихин И.М. Химический состав российских пищевых продуктов/ И.М. Скурихин, В.А. Тутельян. – Москва, 2002.

11. Ковалева О.А. Использование водно-спиртовых настоек на основе растительного сырья при производстве сырокопчёных мясных изделий/ О.А. Ковалева, Е.М. Здрабова, О.С. Киреева. – Журнал Все о мясе. – 2019. – №5.

12. Рыгалова Е.А. Применение выжимок ягод морошки в производстве мясных хлебов/ Е.А. Рыгалова, Л.П. Шароглазова, Н.А. Величко. – Вестник КрасГАУ. 2022. №3 (180).

13. Манжесов В.И. Разработка технологии обогащенного мясорастительного хлеба/ В.И. Манжесов, А.А. Айрапетян, И.А. Глотова. – МНИЖ. 2022. №6-5 (120).

14. Серба Е.М. Плоды брусники - перспективный источник биологически активных веществ/ Е.М. Серба, Г.С. Волкова, Е.Н. Соколова. − Хранение и переработка

сельхозсырья. 2018. – № 4.
15. Лютикова М.Н. Химический состав и практическое применение ягод брусники и клюквы/ М.Н. Лютикова, Э.Х. Ботиров. − Химия растительного сырья. – 2015. – № 2.
16. Белова Е.А. Изучение фенольных соединений ягод трех видов растений рода Vaccinium, произрастающих в Ханты-Мансийском автономном округе/ Е.А. Белова, В.С. Тритэк, З.Т. Шульгау. − Химия растительного сырья. – 2020. – № 1.
17. Замбулаева Н.Д. Исследование антиоксидантных и антимикробных свойств биопротекторов из отходов соковых производств как ингредиентов для обогащения продуктов питания/ Н.Д. Замбулаева, С.Д. Жамсаранова. − Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. – 2018. – №1 (24).
18. Табакаева О.В. Перспективы использования экстракта брусники в технологии производства мясного хлеба / О.В. Табакаева, Л.А. Ивашина, Н.А. Кабанов. – Перспективы развития пищевой промышленности и общественного питания: техника, технологии и управление качеством: материалы Нац. науч.-техн. конф. –Владивосток: Дальрыбвтуз. 2023. – С. 186-190.
19. ГОСТ 9959-2015 Мясо и мясные продукты. Общие условия проведения органолептической оценки. М.: Стандартинформ, 2016. – 24 с.
20. ГОСТ 23042-2015 Мясо и мясные продукты. Методы определения жира. М.: Стандартинформ, 2019. – 16 с.
21. ГОСТ 25011-2017 Мясо и мясные продукты. Методы определения белка. М.: Стандартинформ, 2018. – 16 с.
22. ГОСТ 8558.1-2015 Продукты мясные. Методы определения нитрита. М.: Стандартинформ, 2016. – 16 с.
23. ГОСТ 9793-2016 Мясо и мясные продукты. Методы определения влаги. М.: Стандартинформ, 2018. – 16 с.
24. ГОСТ 31747-2012 Методы выявления и определения количества бактерий группы кишечных палочек (колиформных бактерий). М.: Стандартинформ, 2013. – 20 с.
25. ГОСТ 31659-2012 Продукты она пищевые. Метод выявления бактерий рода Salmonella. М.: Стандартинформ, 2013. – 19 с.
26. ГОСТ 31746-2012 Продукты пищевые. Методы выявления и определения количества коагулазоположительных стафилококков и staphylococcus aureus. М.: Стандартинформ, 2013. – 28 с.
27. ГОСТ 29185-2014 Микробиология пищевых продуктов и кормов для животных. Методы выявления и подсчета сульфитредуцирующих бактерий, растущих в анаэробных условиях. М.: Стандартинформ, 2015. – 16 с.
28. ГОСТ 26927-86 Сырье и продукты пищевые. Метод определения ртути. М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 20 с.
29. ГОСТ Р 51766-2001 Сырье и продукты пищевые. Атомно-абсорбционный метод определения мышьяка. Официальное издание. М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 16 с.
30. ГОСТ 26932-86 Сырье и продукты пищевые. Методы определения свинца. М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 20 с.
31. ГОСТ 26933-86 Сырье и продукты пищевые. Методы определения кадмия (с Изменением N 1). Официальное издание. - М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 20 с.
32. ГОСТ Р 54016-2010 Продукты пищевые. Метод определения содержания цезия Cs-137. М.: Стандартинформ, 2011. – 16 с.
33. ГОСТ Р 54017-2010 Продукты пищевые. Метод определения содержания стронция Sr-90. М.: Стандартинформ, 2011. 20 с.
34. Овсянникова Е.А. Интенсификация экстракционных процессов биокаталитическим методом/ Е.А. Овсянникова, М.В. Понамарёва, А.Н. Потапов, Т.Ф. Киселёва. − Вестник КрасГАУ. – 2013. – № 1.
35. Табакаева О.В. Перспективы использования экстракта брусники в технологии производства мясного хлеба. 2023. – С. 186-190.
36. ГОСТ 23670-2019 Изделия колбасные вареные мясные/ Технические условия. М.: Стандартинформ, 2019. – 10 с.
37. ГОСТ 31986-2012 Метод органолептической оценки качества продукции общественного питания: Сб. ГОСТов. − М.: Стандартинформ, 2010. – 10 с.

*Статья поступила в редакцию 27.03.2024*
*Статья принята к публикации 17.06.2024*

УДК 612.392.64
EDN: DYDPNR

# ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ИНГРЕДИЕНТНОГО СОСТАВА НА СОДЕРЖАНИЕ ЙОДА В ГОТОВЫХ ИЗДЕЛИЯХ ИЗ РЫБЫ

© Автор(ы) 2024

SPIN: 5021-4720
AuthorID: 380981
ORCID: 0000-0003-4592-8382
ResearcherID: E-3977-2014
ScopusID: 57200382550

**МАЮРНИКОВА Лариса Александровна,** доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры технологии и организации общественного питания
*Кемеровский государственный университет*
*(650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, д. 6, e-mail: nir30@mail.ru)*

SPIN: 7513-1585
AuthorID: 307536
ORCID: 0000-0003-2479-8750
ResearcherID: E-9331-2014
ScopusID: 57190976010

**ДАВЫДЕНКО Наталия Ивановна,** доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой технологии и организации общественного питания
*Кемеровский государственный университет*
*(650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, д. 6, e-mail: nat1861@yandex.ru)*

SPIN: 2081-7995
AuthorID: 1102029
ORCID: 0000-0003-3441-4351
ResearcherID: AAZ-8013-2021
ScopusID: 57221330376

**ЗИРКА Анна Юрьевна,** ассистент кафедры технологии и организации общественного питания
*Кемеровский государственный университет*
*(650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, д. 6, e-mail: zirka.anna05@gmail.com*)

SPIN: 1741-9576
AuthorID: 353426
ORCID: 0000-0001-8917-7299
ResearcherID: AAZ-3976-2021
ScopusID: 57216442162

**ЛАА Сайлана Радионовна**, магистрант кафедры технологии и организации общественного питания
*Кемеровский государственный университет*
*(650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, д. 6, e-mail: lana_lana_laa@mail.ru)*

**Аннотация.** Среднесуточное потребление йода в России составляет менее 50% от рекомендуемой нормы, что в значительной степени сказывается на здоровье нации. Решение данной проблемы требует формирования многоаспектных программ профилактики. Основным источником йода в питании являются рыбные и нерыбные продукты моря. Учитывая специфику местоположения определенных регионов России, при транспортировке пищевой продукции существует риск снижения содержания йода в готовой продукции. В рамках работы изучено содержание йода в рубленых изделиях из рыбного комбинированного фарша (минтай, треска, путассу) на разных этапах технологического цикла (в сырье, в готовом изделии). При сравнении справочного и фактического содержания йода в рыбном сырье было выявлено, что отклонение фактического от справочного содержания составило от 22 до 37% в меньшую сторону. При термической обработке отклонение фактического содержания от расчетного (согласно справочному содержанию йода в сырье с учетом потерь при термической обработке) в готовой продукции составило от 46 до 53% в меньшую сторону. Средний процент потерь йода при термической обработке составил 36%, в отличие от справочного – 15%. Данные факты свидетельствуют о необходимости актуализировать данные по нутриентному составу пищевых продуктов. Сравнительный анализ факторов (вкусовые качества, содержание йода, потери при тепловой обработке) показал преимущества блюд при комбинировании рыбного сырья по сравнению с монопродуктами.

**Ключевые слова:** дефицит йода, рыбное сырье, принцип комбинирования, рецептуры, тепловая обработка, потери йода, готовые рыбные блюда, профилактика йододефицита.

# STUDYING THE INFLUENCE OF INGREDIENT COMPOSITION ON IODINE CONTENT IN READY FISH PRODUCTS

© The Author(s) 2024

**MAYURNIKOVA Larisa Aleksandrovna**, doctor of technical sciences, professor,
professor of Technology and Organization of Public Catering Department
*Kemerovo State University*
*(650000, Russia, Kemerovo, Krasnaya st., 6, e-mail: nir30@mail.ru)*
**DAVYDENKO Nataliia Ivanovna**, doctor of technical sciences, associate professor,
head of Technology and Organization of Public Catering Department
*Kemerovo State University*
*(650000, Russia, Kemerovo, Krasnaya st., 6, e-mail: nat1861@yandex.ru)*
**ZIRKA Anna Yurievna,** assistant of Technology and Organization of Public Catering Department
*Kemerovo State University*
*(650000, Russia, Kemerovo, Krasnaya st., 6, e-mail: zirka.anna05@gmail.com)*
**LAA Saylana Radionovna**, master's student Technology and Organization of Public Catering Department
*Kemerovo State University*
*(650000, Russia, Kemerovo, Krasnaya st., 6, e-mail: lana_lana_laa@mail.ru)*

**Abstract**. The average daily iodine consumption in Russia is less than 50% of the recommended norm, which significantly affects the health of the nation. Solving this problem requires the formation of multidimensional prevention programs. The main source of iodine in the diet is fish and non-fish seafood. Given the specific location of certain regions of Russia, when transporting food products there is a risk of reducing the iodine content in finished products. As part of the work, the iodine content in chopped products from combined minced fish (pollock, cod, blue whiting) at different stages of the technological cycle (in raw materials, in the finished product) was studied. When comparing the reference and actual iodine content in fish raw materials, it was revealed that the deviation of the actual from the reference content ranged from 22 to 37% downwards. During heat treatment, the deviation of the actual content from the calculated one (according to the reference iodine content in raw materials, taking into account losses during heat treatment) in the finished product ranged from 46 to 53% downwards. The average percentage of iodine loss during heat treatment was 36% unlike the reference one - 15%. These facts indicate the need to update data on the nutrient composition of food products. A comparative analysis of factors (taste, iodine content, losses during heat treatment) showed the advantages of dishes when combining fish raw materials compared to single products.

**Keywords**: iodine deficiency, fish raw materials, principle of combination, recipes, heat treatment, iodine loss, ready-made fish dishes, prevention of iodine deficiency.

***Для цитирования:*** *Маюрникова Л.А. Изучение влияния ингредиентного состава на содержание йода в готовых изделиях из рыбы / Л.А. Маюрникова, Н.И. Давыденко, А.Ю. Зирка, С.Р. Лаа // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 2(66). – С. 92-99. – EDN: DYDPNR.*

**Введение.** Питание оказывает первостепенное влияние на все сферы жизни человека [1], в этой связи проблема обеспечения населения полноценным питанием с учетом социально-экономического развития общества не теряет своей актуальности. При недостаточном поступлении в организм некоторых нутриентов, как правило, страдает иммунная система, интеллектуальные и физические способности, психическое и психологическое благополучие [2]. Одним из негативных последствий изменения пищевых привычек населения за последнее двадцатилетие стал рост потребления рафинированных продуктов питания на фоне снижения потребления продуктов высокой пищевой и биологической ценности [3].

Одной из важнейших систем в организме человека является щитовидная железа, которая принимает участие практически во всех биологических процессах. Наиболее важным микронутриентом для функционирования эндокринной системы является йод [4] – элемент, дефицит которого может развивать множество необратимых патологий в организме, особенно у детей при формировании их когнитивных способностей. Проблема актуальна для многих регионов РФ, где наблюдается его недостаточное потребление с пищей [5;6]. Согласно литературным данным, фактическое потребление йода в России варьируется от 40 до 80 мкг [6], что составляет от 25 до 55% от рекомендуемой суточной потребности для взрослого человека (150 мкг в сутки) [8]. В связи с тем, что такая эпидемиологическая обстановка существуют много лет, разработаны и реализуются различные меры профилактики дефицита йода. Зарубежный и отечественный опыт показывают, что наиболее эффективным методом является обогащение продуктов питания дефицитными микронутриентами с последующим включением их в рацион организованных групп населения. Так, самым массовым в реализации и потреблении обогащенным продуктом является йодированная соль. Согласно исследованиям [8] некоторые страны Европы и центральной Азии успешно решают проблему дефицита йода на своей территории за

счет всеобщего йодирования соли, однако ряду стран (Россия, Таджикистан, Украина, Узбекистан и др.) требуются дополнительные усилия для ликвидации данного заболевания [8]. О глобальности проблемы свидетельствуют данные статистики всемирной организации здравоохранения – из 194 стран у 21 (включая Россию) наблюдается недостаточное потреблений йода населением [9, 10]. В этой связи актуально расширение ассортимента пищевых продуктов с повышенным содержанием йода, при этом отслеживая их реализацию и оборот [11]. Подобный контроль необходим для избегания чрезмерного его содержание в рационе, что может негативно сказываться на здоровье. Специалисты ряда стран считают необходимым проводить исследования по актуализации данных химического содержания нутриентов в продовольственном сырье и готовых продуктах питания [12, 13]. В России сформирована база данных по химическому составу пищевых продуктов, которая применяется при расчете пищевой и энергетической ценности рационов [14, 15]. Проводятся исследования по актуализации данных по содержанию различных дефицитных нутриентов в пищевых продуктах [16,17], однако результаты не обобщены и не систематизированы по каким-либо признакам, например, по территориальному [18].

Известно, что разработка и реализация профилактических мер, направленных на снижение дефицита йода, как, впрочем, и других нутриентов, должна начинаться с оценки ситуации. В этой связи проведены исследования статистических данных по России и, в частности, по Кемеровской области, которые дают понимание распространенности и глубины дефицита йода. В Кузбассе значительной части населения малодоступны основные источники продуктов питания богатых йодом (рыба и продукция нерыбного промысла). Согласно государственному докладу «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Кемеровской области в 2022 году» [19], в 2021 году почти у 13 тыс. человек были выявлены заболевания, связанные с дефицитом йода. Число людей с заболеваниями, связанными с дефицитом йода, с 2010 по 2021 г представлено на рисунке 1.

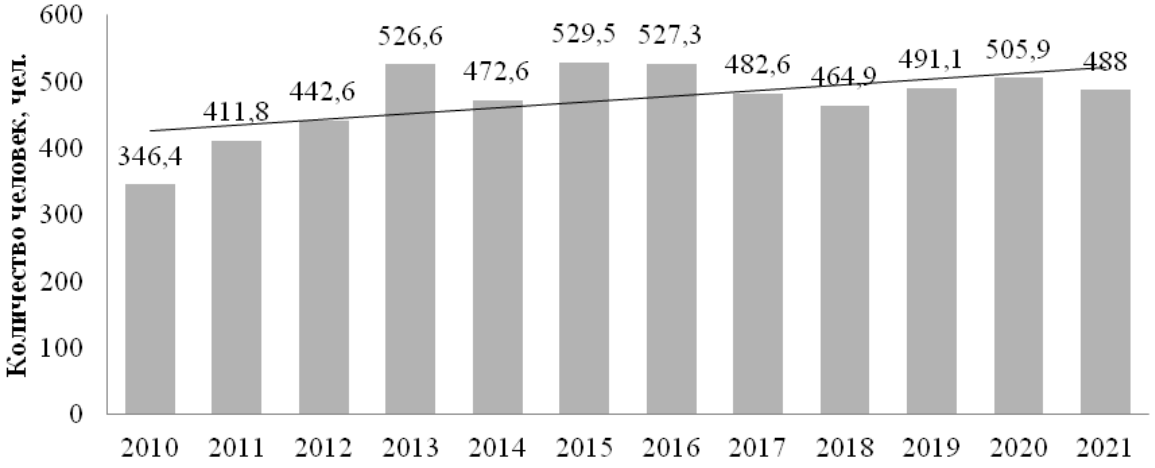



*Рисунок 1 – Динамика впервые выявленной заболеваемости, связанной с йодной недостаточностью в Кемеровской области в 2009–2021 гг., на 100 тыс. населения*

Отмечается положительная динамика ежегодного выявления заболеваний, связанных с йодной недостаточностью. Приведенные результаты анализа статистических данных свидетельствуют о необходимости усиления исследований в рамках программ профилактики микронутриентой недостаточности у населения. Считаем целесообразным и перспективным разработку рецептур и технологий продукции с повышенным содержанием йода на основе комбинирования различных видов рыб, как основного источника легкоусвояемого йода [20], для включения ее в рационы различных групп населения.

**Методология.** Целью исследования являлась разработка рецептуры рыбного рубленого изделия с повышенным содержанием йода на основе принципа комбинирования исходного сырья

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Дать количественную оценку фактического содержания йода в исходном сырье: минтай, треска и путассу с целью выявления отклонений от справочных данных.

2. Разработать комбинированный из разных видов рыб состав рубленых полуфабрикатов с высоким содержанием йода на основе совокупности результатов органолептической оценки опытных образцов и содержания в них йода.

Объектами исследования являлись: свежемороженое филе рыб, приобретенное методом случайной выборки на рынке г. Кемерово: минтай (район промысла – Охотское море), треска (район промысла – FAO 27), путассу (район промысла – Северо-Восточная Атлантика), соответствующие требованиям ТР ЕАЭС 040/2016 "О безопасности рыбы и рыбной

продукции"; изделия рубленые из рыбного сырья в различных соотношениях; в качестве контрольного образца использовали изделия из рыбного фарша, приготовленные по сборнику рецептур [21].

Методы исследования: фактическое содержание йода определяли по МУ 08-47/206 «Пищевые продукты и продовольственное сырье. Вольтамперометрический метод измерения массовой концентрации йода» [22].

Органолептически оценивали вкус изделий и по 10 балльной шкале (приятный (8-10), не выраженный (4-7), неприятный (1-3)) и степень выраженности приятного рыбного вкуса. Потребительские характеристики определялись следующим образом: 1. Общая оценка вкуса – определение степени приятности вкуса. 2. Общая оценка приятного рыбного вкуса – определение степени приятности именно характерного рыбного вкуса с присущим продуктам из рыбного сырья послевкусием. 3. Общая оценка – совокупный показатель, который объединяет описанные выше показатели.

Содержание йода в сырье и готовой продукции анализировали в виде:

– справочного содержания – содержания йода в используемом рыбном сырье для производства готовых блюд с учетом потерь 15% согласно справочным данным [14]. При определении справочного содержания йода в комбинированных рыбных изделиях производили расчеты в зависимости от процентного содержания сырья в рецептуре.

– расчетного содержания – содержания йода в готовой продукции, рассчитанного на основе предварительно установленного фактического содержания йода в используемом рыбном сырье с учетом потерь согласно справочным данным – 15% [14].

– фактического содержания – содержания йода, полученного экспериментальным путем в готовых изделиях.

Сравнение фактического и справочного содержания йода в сырье, полуфабрикатах и готовой продукции проводили методом расчета абсолютного и относительного отклонений.

**Результаты.** Кемеровская область расположена в центральной части Российской Федерации, что объясняет зависимость от поставок рыбы и продуктов ее переработки. При этом необходимо отметить рост объемов собственного производства рыбной продукции малыми предприятиями региона, которые занимаются рыбоводством. Так, производство рыбы пресноводной живой в 2023 году по сравнению с 2022 годом увеличилось на 7,1% и составило 691,2 тонн [23]. Можно предполагать, что совокупность внешнего, внутреннего импорта и рыбы собственного производства потенциально обеспечивает рынок Кузбасса. Для части населения с низкими доходами и коллективов с организованным питанием (социальное питание) важна стоимостная характеристика рыбы и продуктов ее переработки. Для обеспечения населения рыбной продукцией как источника многих незаменимых нутриентов, в том числе йода, необходима разработка и реализация следующих направлений:

– повышение культуры потребления;

– повышение доступности рыбной продукции;

– расширение ассортимента и повышение качества готовой рыбной продукции с учетом возрастных предпочтений.

Качество рыбной продукции, как и других видов пищевой продукции, зависит от качества исходного сырья. Причинами снижения пищевой ценности, как составляющей качества в рыбном сырье являются: несовершенство логистической системы доставки его в центральную часть России, в частности Кемеровскую область; возможные нарушения условий транспортировки и хранения; низкая частота потребления, что приводит к длительному хранению на рынке и т.д.

Ранее проведенные исследования по потребительским предпочтениям школьников в отношении продукции из рыбы показывают, что более 70% опрошенных употребляют рыбные и нерыбные продукты моря менее 4 раз в месяц, что подчеркивает необходимость улучшения органолептических показателей рыбной продукции, поскольку рыбные продукты являются основным источником йода в рационе.

Современные тенденции разработки полноценных по пищевой и биологической ценности продуктов питания направлены на применение метода комбинирования рецептурных компонентов различного происхождения. Примером таких продуктов могут быть мясорастительные консервы, кисломолочная продукция с плодово-ягодными добавками, введение в традиционные продукты обогащающих добавок и т.д. На этапе постановки эксперимента в работе была выдвинута гипотеза об улучшении органолептических показателей рыбных рубленых изделий и повышении содержания йода в готовых изделиях в сравнении с монопродукцией путем комбинирования разных видов рыб.

При выборе видов рыб для приготовления рубленых полуфабрикатов учитывали следующие факторы: физическая и экономическая доступность и содержание йода в исходном сырье. Анализ частоты включения в меню школьного питания блюд из рыбы показал целесообразность использования в эксперименте рыб следующих видов: минтай, треска и путассу.

Изучали фактическое и справочное содержание йода в рыбном сырье и отклонение от справочных данных [14,15], результаты представлены в таблице 1.

Как видно из данных таблицы, отклонение фактического содержания йода от справочного значения варьируется от 22 до 37%. Т.е. в цепочке потерь йода при тепловой обработке сырья/полуфабрикатов и усвояемости его в организме, уже на этапе исходного сырья потери йода велики.

В данной работе для проектирования рецеп-

тур рубленых рыбных изделий применялся метод комбинирования различного вида рыбного сырья (минтай, треска, путассу) с различным соотношением в составе рубленого полуфабриката с шагом 25%. Матрица опытных образцов составов представлена в таблице 2.

Основными факторами, формирующими качество готовой продукции, являются: метод проектирования, рецептура и технология. При приготовлении рыбных рубленых изделий использовали традиционную технологию, широко используемую на предприятиях, предоставляющих питание организованным коллективам [21]. Готовые полуфабрикаты обжаривали основным способом (160º С) в течение 8 мин, доводили до готовности в жарочном шкафу (180º С) в течение 5 минут.

Так как содержание йода в исследуемых видах рыб, согласно справочным данным, примерно одинаковое (от 135 до 150 мкг в 100 г), большее внимание уделяли вкусовым качествам опытных образцов.

В ходе проведения эксперимента было определено, что запах и внешний вид у приготовленных образцов отличался незначительно, вследствие чего эти показатели не учитывали. Результаты усредненной экспертной органолептической оценки представлены в таблице 3.

*Таблица 1 – Содержание йода в исследуемом рыбном сырье*

| Наименование рыбного сырья | Справочное значение, мкг/100 г | Фактическое значение, мкг/100 г | Абсолютное отклонение фактического от справочного содержания, мкг/100 г (Относительное отклонение,%) |
|---|---|---|---|
| минтай замороженный | 150 | 94,3±2,8 | 56 (37%) |
| треска замороженная | 135 | 105,0±3,1 | 30 (22%) |
| путассу замороженная | 135 | 97,1±2,9 | 38 (28%) |

*Таблица 2 – Матрица опытных образцов изделий из рыбного фарша с разным соотношением рыбного сырья*

| № образца | Содержание рыбного сырья в изделии,% | | |
|---|---|---|---|
| | минтай | треска | путассу |
| 1 | 100 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 100 |
| 3 | 0 | 100 | 0 |
| 4 | 50 | 50 | 0 |
| 5 | 0 | 50 | 50 |
| 6 | 50 | 0 | 50 |
| 7 | 33 | 33 | 33 |
| 8 | 50 | 25 | 25 |
| 9 | 25 | 50 | 25 |
| 10 | 25 | 25 | 50 |

*Таблица 3 – Органолептическая оценка образцов готовых изделий*

| № образца | Общая оценка вкуса, балл | Общая оценка приятного рыбного вкуса, балл | Общая оценка, балл |
|---|---|---|---|
| 1 | 7,35±2,2 | 8,65±1,7 | 16,00 |
| 2 | 6,85±1,5 | 8,50±2,6 | 15,35 |
| 3 | 8,15±2,4 | 7,85±2,8 | 16,00 |
| 4 | 7,50±3,6 | 8,35±1,2 | 15,85 |
| **5** | **8,50±1,2** | **9,00±1,0** | **17,50** |
| 6 | 7,85±0,8 | 7,65±2,1 | 15,50 |
| 7 | 7,50±1,8 | 8,35±2,9 | 15,85 |
| **8** | **9,15**±1,9 | **8,50**±1,8 | **17,65** |
| **9** | **8,35**±3,1 | **8,00**±2,7 | **16,35** |
| **10** | **8,50**±2,9 | **8,35**±2,7 | **16,85** |

Анализ данных органолептической оценки показал, что наименьший балл получил монопродукт из рыбы путассу (15,35), наивысший балл – изделия из комбинированного фарша (минтай-треска-путассу) – (16,85). Ранжирование оценок образцов имело вид: 8> 5> 10> 9> 1> 3> 4> 7> 6> 2. Результаты данных исследований не подвергались сложной математической обработке, поскольку это эвристический метод оценки качества, поэтому на основании первых четырех образцов можно предположить, что комбинирование разных видов рыб в готовом изделии способствует улучшению органолептических свойств, что подтверждает ранее выдвинутую гипотезу.

Для проверки гипотезы о возможном повышении содержания йода в готовых изделиях в сравнении с монопродукцией определяли фактическое содержание йода в готовых рубленых изделиях и сравнивали полученные результаты со значениями, полученными расчетным путем. Расчеты проводили с учетом полученных результатов, представленных в таблице 1, величину потерь при тепловой обработке

принимали по справочным данным – 15%. Далее экспериментальным путем определяли фактическое содержание йода во всех образцах готовых изделий из рыбного фарша с последующим расчетом фактических потерь йода при тепловой обработке. Результаты математических расчетов и результатов собственных исследований представлены в таблицах 4 и 5.

В научной литературе широко обсуждается вопрос о низком уровне удовлетворенности организма человека нутриентами, несмотря на имеющиеся современные технологии оптимизации рациона и доведении его до «идеального» при помощи специализированных программ. Основная причина заключается в потерях нутриентов, в частности йода, при тепловой обработке на этапе производства готовой продукции. С целью установления абсолютного и относительного отклонения содержания йода в готовой продукции проведен сравнительный анализ фактического и справочного содержания йода (табл. 6.).

*Таблица 4 – Определение содержания йода в готовых изделиях из рыбы расчетным методом*

| № образца | Характеристика образца | Расчетное содержание, мкг/на порцию (144 г) | Расчетное содержание, мкг/100 г | Расчетное содержание с учетом справочных потерь при тепловой обработке, мкг/100 г |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Минтай 100% | 75,20 | 52,22 | 44,39 |
| 2 | Путассу 100% | 77,60 | 53,89 | 45,81 |
| 3 | Треска 100% | 77,60 | 53,89 | 45,81 |
| 4 | Минтай 50%, Треска 50% | 79,60 | 55,28 | 46,99 |
| 5 | Треска 50%, Путассу 50% | 80,80 | 56,11 | 47,69 |
| 6 | Минтай 50%, Путассу 50% | 76,40 | 53,06 | 45,10 |
| 7 | Минтай 33%, Треска 33%, Путассу 33% | 79,92 | 55,50 | 47,18 |
| 8 | Минтай 50%, Треска 25%, Путассу 25% | 78,00 | 54,17 | 46,04 |
| 9 | Минтай 25%, Треска 50%, Путассу 25% | 80,20 | 55,69 | 47,34 |
| 10 | Минтай 25%, Треска 25%, Путассу 50% | 78,60 | 54,58 | 46,40 |

*Таблица 5 – Фактическое содержание йода в готовых изделиях с указанием потерь при термической обработке*

| № образца | Характеристика образца | Расчетное содержание, мкг/100 г | Расчетное содержание с учетом потерь при тепловой обработке, мкг/100 г | Фактическое содержание, мкг/100 г | Фактические потери при тепловой обработке,% | Абсолютное отклонение фактического содержания от расчетного, мкг/100 г |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Минтай 100% | 52,22 | 44,39 | 36,0±1,1 | 31 | -8,4 |
| 2 | Путассу 100% | 53,89 | 45,81 | 30,0±0,9 | 44 | -15,8 |
| 3 | Треска 100% | 53,89 | 45,81 | 37,1±1,1 | 31 | -8,8 |
| 4 | Минтай 50%, Треска 50%, | 55,28 | 46,99 | 33,1±3,1 | 31 | -13,89 |
| 5 | Треска 50%, Путассу 50% | 56,11 | 47,69 | 44,7±1,3 | 22 | -3,7 |
| 6 | Минтай 50%, Путассу 50% | 55,50 | 47,18 | 36,1±3,1 | 31 | -11,08 |
| 7 | Минтай 33%, Треска 33%, Путассу 33% | 54,17 | 46,04 | 29,1±3,1 | 31 | -16,94 |
| 8 | Минтай 50%, Треска 25%, Путассу 25% | 54,17 | 46,04 | 36,5±1,1 | 33 | -10,0 |
| 9 | Минтай 25%, Треска 50%, Путассу 25% | 55,69 | 47,34 | 25,6±0,7 | 55 | -22,3 |
| 10 | Минтай 25%, Треска 25%, Путассу 50% | 54,58 | 46,40 | 34,89±1,0 | 35 | -11,4 |

*Таблица 6 – Сравнительный анализ справочного и фактического содержания йода*

| № образца | Характеристика образца | Справочное содержание с учетом потерь, мкг/100 г | Фактическое содержание в готовом изделии, мкг/100 г | Абсолютное отклонение фактического содержания от справочного, мкг/100 г | Относительное отклонение фактического содержания от справочного,% |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Минтай 100% | 70,83 | 36,0±1,1 | -34,83 | 49,18 |
| 2 | Путассу 100% | 63,75 | 30,0±0,9 | -33,75 | 52,94 |
| 3 | Треска 100% | 63,75 | 37,1±1,1 | -26,75 | 41,96 |
| 4 | Минтай 50%, Треска 50%, | 67,29 | 33,1±3,1 | -34,19 | 50,81 |
| 5 | Треска 50%, Путассу 50% | 63,75 | 44,7±1,3 | -19,75 | 30,98 |
| 6 | Минтай 50%, Путассу 50% | 67,29 | 36,1±3,1 | -31,19 | 46,35 |
| 7 | Минтай 33%, Треска 33%, Путассу 33% | 65,45 | 29,1±3,1 | -36,35 | 55,54 |
| 8 | Минтай 50%, Треска 25%, Путассу 25% | 67,29 | 36,5±1,1 | -31,29 | 46,50 |
| 9 | Минтай 25%, Треска 50%, Путассу 25% | 65,52 | 25,6±0,7 | -40,52 | 61,84 |
| 10 | Минтай 25%, Треска 25%, Путассу 50% | 65,52 | 34,89±1,0 | -30,52 | 46,58 |

Наименьшие отклонения фактического содержания йода от справочного имели образцы № 5, 3, 8, 6, (в среднем от 30 до 46%) три из которых являлись комбинированными продуктами, и один – монопродукт – треска. Наибольшие отклонения фактического содержания йода от справочного имели образцы № 4, 2, 7 ,9 (в среднем от 50 до 61%), из которых также один монопродукт – путассу. Т.е. сравнительный анализ по относительному отклонению не дает однозначного ответа о повышенном содержании йода в комбинированных изделиях в сравнении с монопродуктами. При этом необходимо отметить в целом высокие отклонения между справочным и фактическим содержанием йода: половина исследуемых образцов имели фактическое значение йода в 100 г продукта ниже справочного в среднем на 50% и более. Это подтверждает актуальность проведения подобных исследований при разработке продуктов питания для профилактики дефицита йода, накопления базы данных по фактическому содержанию йода в разных видах продовольственного сырья и учете фактических потерь при составлении рационов.

**Обсуждение.** Достаточно большой объем экспериментальных данных позволил расширить понимание проблемы формирования дефицита йода в организме за счет поступления с его с пищей.

По результатам исследования фактического содержания йода в готовых исследуемых образцах рыбных изделий определены средние потери йода при термической обработке фарша рыбного, которые составили 36%, что больше общепринятого процента потерь практически в два раза (справочные 15%) (табл. 4-5).

В рыбном сырье, реализуемом на рынке г. Кемерово, фактическое содержание йода в среднем на 30% ниже справочного, что свидетельствует о значительном завышении рассчитываемого содержания йода в рационах, составленных на основе справочных данных (табл. 6).

Анализ, обобщение и систематизация всего объема полученных экспериментальных данных позволили создать матрицу ранжирования образцов по трем показателям: фактическое содержание йода в готовых рыбных продуктах, фактические потери йода при тепловой обработке и балльная оценка вкусовых восприятий при дегустации продукции (табл. 7).

За основные факторы при сравнительном анализе приняли балльную оценку вкусовых восприятий, содержание йода в готовых изделиях и потери при тепловой обработке. Лучшие результаты балльной оценки имели образцы № 8 (Минтай 50%, Треска 25%, Путассу 25%) и № 5 (Треска 50%, Путассу 50%). Разница в баллах незначительна: 17,65 и 17,50 соответственно. Фактическое содержание йода в образце № 5 самое высокое: 44,7±1,3 мкг/100г, содержание йода в образце № 8 меньше, но при этом он в ранжируемом ряду из десяти позиций, занимает третью (36,5±1,1).

*Таблица 7 – Матрица ранжирования образцов по показателям, которые способны влиять на выбор рыбных продуктов*

| Наименование показателя | Ранжирование результатов по номерам образцов (от лучшего к худшему) | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Фактическое содержание йода в 100 г при тепловой обработке (от большего к меньшему) | № 5 | № 3 | № 8 | № 6 | № 1 | № 10 | № 4 | № 2 | № 7 | № 9 |
| Фактические потери йода, (от меньшего к большему) | № 5 | № 1, № 3, № 4, № 6, № 7 | | | | | № 8 | № 10 | № 2 | № 9 |
| Балльная оценка (от большего к меньшему) | № 8 | № 5 | № 10 | № 9 | № 1 | № 3 | № 4 | № 7 | № 6 | № 2 |

Сравнительный анализ монопродуктов из рыбы по аналогии показал, что в общем числовые значения рассматриваемых показателей ниже в сравнении с образцами под номерами № 5 и 8, однако образец монопродукта Минтай 100% (образец № 1) – занимает в матрице пятую позицию как по фактическому содержанию йода (36,0±1,1 мкг/100г), так и по вкусовым характеристикам (16,00), потери йода также относительно низкие – 31%.

Таким образом, не наблюдается однозначного подтверждения выдвинутой гипотезы о положительном влиянии комбинирования разных видов рыб при производстве рыбных изделий на содержание йода: по совокупности показателей наивысшие результаты получили следующие образцы: № 5 (Треска 50%, Путассу 50%), № 8 (Минтай 50%, Треска 25%, Путассу 25%), № 3 (Треска 100%), № 10 (Минтай 25%, Треска 25%, Путассу 50%), № 1 (Минтай 100%).

**Выводы.** Оптимизация рационов для разных групп населения – важная научно-практическая задача, для решения которой используются различные современные подходы, методы и методики. Однако в большей части при разработке рационов в коллективах с организованным питанием для расчета пищевой ценности используют рекомендованные Справочники химического состава продовольственного сырья и пищевых продуктов. Учитывая многообразие факторов, оказывающих влияние на химический состав и пищевую ценность пищевой продукции, можно говорить о несоответствии числовых значений фактических и справочных. В этой связи при проектировании рецептур новых видов продуктов с повышенной пищевой ценностью разных однородных групп целесообразен индивидуальный подход, учитывающий влияние ингредиентного состава на содержание дефицитных нутриентов в готовых изделиях. Для этого можно руководствоваться имеющимися официальными результатами исследований по фактическому содержанию тех или иных нутриентов, представленных в научных статьях,

диссертациях, монографиях. Например, результаты исследований, изложенных в данной статье, свидетельствуют о необходимости учитывать потери йода на всех этапах производства продукции от идеи (проекта рецептуры) до реализации потребителю. Согласно справочным данным, для удовлетворения суточной потребности необходимо употребить 230 г готовых котлет из рассматриваемого в статье рыбного сырья, а фактически это количество должно составлять 430 г, что значительно снижает эффективность применения составляемых для профилактики йододефицита рационов. Данные факты свидетельствуют о необходимости количественного увеличения или расширения ассортимента рыбной продукции при составлении рационов для организованного питания, с этой целью можно рекомендовать продукцию из комбинированного рыбного сырья, поскольку, по результатам исследований, она обладает более высокими органолептическими показателями.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Тутельян, В.А. Здоровое питание для общественного здоровья // Общественное здоровье. – 2021. – Т. 1. – № 1. С. 56-64. DOI 10.21045/2782-1676-2021-1-1-56-64. EDN: MOMMXI.

2. Трошина, Е.А. Устранение дефицита йода – забота о здоровье нации. Экскурс в историю, научные аспекты и современное состояние правового регулирования проблемы в России // Проблемы эндокринологии. 2022. – Т. 68. – № 4. – С. 4-12. DOI 10.14341/probl13154. EDN: GAKKBM.

3. Zemlyanova Marina A., Koldibekova Yuliya V., Peskova Ekaterina V. Approaches to rational nutrition of the population of industrialized regions exposed to aerogenic impact of aromatic hydrocarbons // Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. – 2022. – №4.

4. Тутельян В.А., Смирнова Е.А. Современные вызовы пищевой индустрии: роль пищевых микроингредиентов // Пищевые ингредиенты в продуктах питания: от науки к технологиям: Монография / Под редакцией В.А. Тутельяна, А.П. Нечаева, М.Г. Балыхина. 2-е издание, исправленное и дополненное. Москва: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский государственный университет пищевых производств", 2021. – С. 15-44. EDN: RQEFCG.

5. Mayurnikova L.A., Zinchuk S.F., Parmenova E.V., Zinchuk V.G. Technique and technological solutions for creanion iodine-enriched prophylactic beverages // Journal of International Scientific Publications: Agriculture & Food. – 2013. – Т. 1. – № 2. – С. 132-136.

6. Мельниченко Г.А., Трошина Е.А., Герасимов Г.А. Йододефицитные заболевания как неинфекционная эпидемия: взгляд на проблему в условиях пандемии COVID-19// Терапевтический архив. – 2020. – 92 (10): 4-8. DOI: 10.26442/00403660.2020.10.000768

7. Тутельян В.А., Никитюк Д.Б., Аксенов И.В. Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации: Методические рекомендации МР 2.3.1.0253-21. Москва: Роспотребнадзор, 2021. – 72 с. ISBN 978-5-7508-1862-4. EDN: MAYTEB.

8. Turcan L., Gerasimov G.A., Parvanta I., Timmer A. Progress in iodine deficiency disorders (idd) control and elimination in Europe and central Asia region (ecar) in 2010-2020 // КЭТ. 2021. – №4.

9. Michael B.Z., Maria A. GLOBAL ENDOCRINOLOGY: Global perspectives in endocrinology: coverage of iodized salt programs and iodine status in 2020 // European Journal of Endocrinology. – 2021. – 185(1):13-21. https://doi.org/10.1530/EJE-21-0171.

10. Iodine Global Network. Global Scorecard of Iodine Nutrition in 2020 in the General Population Based on Schoolage Children. Ottawa, Canada: IGN, 2021 [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.ign.org/scorecard.htm (дата обращения 7.10.2023).

11. Charlton K Skeaff S. Iodine fortification: why, when, what, how, and who? // Curr Opin Clin Nutr Metab Care. – 2011. – 14:618-624.

12. Khalid N.M., Faridus N., Razak Abd. L., Sukardi N.A., Rashed A.A., Selamat R., et al. Iodine Content of Malaysian Foods// J Nutri Food Sci. – 2019; 9: 764. doi: 10.35248/2155-9600.19.9.764.

13. Haldimann M., Alt A., Blanc A., Blondeau K. Iodine content of food groups// Journal of Food Composition and Analysis. – 2005. – 18. 461-471.

14. Химический состав пищевых продуктов. Кн. 2: Справочные таблицы содержания аминокислот, жирных кислот, витаминов, макро - и микроэлементов, органических кислот и углеводов. Под ред. проф., д-ра техн. наук И.М. Скурихина и проф., д-ра мед. наук М.Н. Волгарева. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 1987. – 360 с.

15. Химический состав и калорийность российских продуктов питания. Тутельян В.А. Справочник. М.: ДеЛи плюс, 2012. – 284 с.

16. Стороженко, А.Ю., Шабанова Ф.И. Результаты определения содержания йода в растениях Омской области // Ratio et Natura. – 2022. – № 1(5). EDN: YMWCMV.

17. Маркова Е.О., Некрасов Д.А., Дьяков М.Ю., Данилов А.А. Определение содержания йода, йодидов и йодатов в пищевых продуктах // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. – 2022. – Т. 22. – № 4. – С. 373-381. DOI 10.18500/1816-9775-2022-22-4-373-381. EDN: IWRMEA.

18. Mayurnikova L.A, Zirka A.Y., Koksharov A.A., Gornikov N.V., Krapiva T.V. Expanding the knowledge base on actual nutrition as an element of the system of alimentary-dependent diseases prevention // E3S Web of conferences Cep. "International Scientific and Practical Conference "Development of the Agro-Industrial Complex in the Context of Robotization and Digitalization of Production in Russia and Abroad", DAIC 2020" 2020.

19. Государственный доклад «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Кемеровской области – Кузбассе в 2022 году», Кемерово, 2023.

20. Bogdanov V.D., Pankina A.V. Evaluating quality of gerodietic fish molded products enriched with seafood cryoconcentrates // Вестник АГТУ. Серия: Рыбное хозяйство. – 2022. – №3.

21. Сборник рецептур блюд и кулинарных изделий для предприятий общественного питания: ГИОРД, 2014. ISBN 978-5-98879-132-4. EDN: RXHDBN.

22. МУ 08-47/206 Пищевые продукты и продовольственное сырье. Вольтамперометрический метод измерения массовой концентрации йода.

23. Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Кемеровской области – Рыболовство и рыбоводство [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://42.rosstat.gov.ru/folder/38698 (дата обращения: 20.02.2024).

*Статья поступила в редакцию 20.03.2024*
*Статья принята к публикации 17.06.2024*

УДК 663.934.4
EDN: XVIILF

# ОЦЕНКА АНТИОКСИДАНТНЫХ СВОЙСТВ НАПИТКОВ, ПРИГОТОВЛЕННЫХ ИЗ КОФЕ РАЗНЫМИ СПОСОБАМИ

©Авторы 2024

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)*

SPIN: 1445-8767
AuthorID: 676808
ORCID: 0009-0003-8798-5366
ResearcherID: KJJ-3911-2024
ScopusID: 57219608939

**ТВЕРСКОЙ Василий Ростиславович**, аспирант Высшей школы сервиса и торговли
*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*
*(194064, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, e-mail: vasilybasil@gmail.com)*

**Аннотация**. В статье представлены результаты исследований антиоксидантных свойств напитков, приготовленных из кофе арабика жареного молотого (7 г на 100 мл) четырьмя способами – в кофемашине (КМ), по-турецки на медленном огне (ТС), в френч-прессе (ФП), холодным способом с настаиванием 24 часа (ХС). В напитках определяли показатели качества – экстрактивные и растворимые сухие вещества, вязкость, активную кислотность; колориметрические характеристики в системе *CIE Lab*: светлота *L**, координаты цвета – *a** и *b*;* количество кофеина, сумму хлорогеновых кислот и полифенов; антиоксидантную активность кулонометрическим титрованием на приборе «Эксперт-006-Антиоксиданты». Антиоксидантная активность напитков зависела от количества экстрактивных веществ, кофеина, суммы хлорогеновых кислот и полифенолов только при использовании для приготовления горячей воды (ТС, ФП) или перегретого пара (КМ). Холодный способ приготовления позволил извлечь наибольшее количество кофеина в напиток среди всех способов приготовления, но уступил по количеству хлорогеновых кислот, полифенолов, и антиоксидантной активности способу приготовления по-турецки на медленном огне. Наиболее эффективным из четырех способов приготовления напитков из кофе является приготовление на медленном огне по-турецки (ТС), который отличается постоянным контактом кофе с горячей водой, что позволяет получить напиток с наиболее высокими антиоксидантными свойствами.

**Ключевые слова:** кофе молотый арабика, способы приготовления, показатели качества, колориметрические характеристики, кофеин, хлорогеновые кислоты, полифенолы, антиоксидантная активность.

# ASSESSMENT OF THE ANTIOXIDANT PROPERTIES OF DRINKS BREWED FROM COFFEE BY DIFFERENT METHODS

© The Authors 2024

**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 Michailovna**, 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: malutesha66@mail.ru)*

**TVERSKOI Vasilii Rostislavovich,** graduate student 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: vasilybasil@gmail.com*

**Abstract.** The article presents the results of studies of the antioxidant properties of drinks from roasted ground Arabica coffee (7 g per 100 ml) brewed in four methods – in a coffee machine (CM), Turkish coffee over low heat (TC), in a French press (FP), and cold brew for 24 hours (CB). Quality indicators were determined in the drinks - extractive and soluble solids, viscosity, active acidity; colorimetric characteristics in the *CIE Lab* system: lightness *L*,* color coordinates – *a** and *b**; the amount of caffeine, the amount of chlorogenic acids and polyphenes; antioxidant activity by coulometric titration on the "Expert-006-Antioxidants" device. The antioxidant activity of drinks depended on the amount of extractives, caffeine, the amount of chlorogenic acids and polyphenols only when used for preparing hot water (TC, FP) or superheated steam (CM). The cold preparation method extracted the greatest amount of caffeine into the drink among all brewing methods, but was inferior in terms of the amount of extraction of chlorogenic acids, polyphenols, and antioxidant activity to the method of preparing Turkish coffee over low heat. The most effective of the four methods of preparing coffee drinks is Turkish coffee (TC), which is characterized by constant contact of coffee with hot water, which allows you to obtain a drink with the highest antioxidant properties.

**Keywords:** ground arabica coffee, brewing methods, quality indicators, colorimetric characteristics, caffeine, chlorogenic acids, polyphenols, antioxidant activity.

***Для цитирования:*** *Нилова Л.П. Оценка антиоксидантных свойств напитков, приготовленных из кофе разными способами / Л.П. Нилова, С.М. Малютенкова, В.Р. Тверской // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 2(66). – С. 100-105. – EDN: XVIILF.*

**Введение.** Кофе один из самых популярных напитков в мире, производство и потребление которого постоянно растет и к 2030 году по прогнозам может достигнуть 12 млн тонн. Ежедневное потребление кофе во всем мире составляет более 3 миллиардов чашек, из которых на долю европейских стран приходится около 33% [1]. В России в последнее время отмечается рост популярности кофе в категории «кофе с собой» [2].

В настоящее время кофе рассматривают не только как тонизирующий напиток источник кофеина, но и как источник веществ, обладающих антиоксидантными свойствами [3, 4], благодаря содержанию которых все больше появляется сведений благоприятного влияния кофе на иммунную систему человека [5]. Полифенолы кофе обладают антипролиферативной и антиэстеразной активностью, что может обеспечить их важное значение для профилактики онкологических и нейродегенеративных заболеваний [6-8]. Алкалоиды пуринового ряда (кофеин, теофиллин, теобромин), содержащиеся в кофе, также проявляют антиоксидантные свойства [9].

Вкусовые качества напитка из жареного кофе зависят не только от ботанического вида кофе (арабика, робуста), степени обжарки зеленого кофе, но и от способа приготовления напитка. В настоящее время существует множество способов приготовления кофе, которые можно разделить на традиционно используемые в индустрии питания и домохозяйствах (эспрессо и американо в кофемашине, кофе по-турецки с медленной экстракцией на огне или горячем песке) [10-12], и новые – френч-пресс, аэропресс, холодный кофе и его разновидности (из зеленых кофейных зерен, с дополнительной обработкой СВЧ) [10, 12-16]. Для упрощения приготовления кофе появились специальные фильтры, позволяющие приготовить напиток в чашке без осадка за 2,5 минуты, но его качество будет зависеть от степени помола и массы кофе для заваривания [17, 18].

В большинстве способов приготовления напитков из кофе лежит использование горячей воды температурой 80-95°С для быстрой экстракции соединений из жареного молотого кофе [10-12]. Способ приготовления кофе эспрессо, сочетая извлечение острым паром и под давлением, обеспечивает максимальное извлечение, как кофеина, так и суммы хлорогеновых кислот [18]. По сравнению со способами приготовления без давления (френч-пресс, аэропресс, мока) заваривание кофе под давлением (эспрессо) увеличивает экстракцию кофеина и полифенолов в 2,5-3 раза [10]. Приготовление кофе на медленном огне позволяет экстрагировать около 3,5% кофеина и 3,9% хлорогеновой кислоты, но увеличивается с повышением массы кофе для приготовления [12].

При холодном способе приготовления кофе время экстракции увеличивается до 24 часов, но даже более длительный промежуток времени позволяет извлечь в напиток на 13-26% меньше кофеина и других БАВ, чем при горячем заваривании за 6 минут в френч-прессе [19].

Антиоксидантный потенциал порции (чашки) кофе зависит от соотношения массы кофе для приготовления и воды даже при использовании одного способа [19, 20]. В разных странах эспрессо готовят из жареного молотого кофе разной степени обжарки массой от 5 до 18 г и воды от 15 до 50 мл, что оказывает влияние на содержание кофеина и суммы хлорогеновых кислот, соотношение которых может варьировать от 0,7 до 4,8 [18, 19]. Увеличение массы кофе на 1 г повышает в напитке содержание кофеина на 4-5%, хлорогеновых кислот – на 18% [20]. При заваривании кофе эспрессо извлекается 65-68% кофеина и 66-74% хлорогеновых кислот, в двойном эспрессо (увеличение объема воды в два раза) экстракция усиливается, составляя 84-88% и 87-94%, соответственно для кофеина и хлорогеновых кислот [19]. Заваривание кофе горячей водой с выдержкой в течение 3-х минут

извлекает кофеина 51,4-61,8%, и 56,5-66,9% хлорогеновых кислот, непропорционально увеличиваясь с повышением массы кофе [13]. Использование разных способов приготовления, отличающихся соотношением кофе и воды, видом и продолжительностью экстракции, степенью обжарки кофейных зерен, а также различия в единицах представления результатов (на объем, порцию, сухое вещество кофе) по мнению [10, 19, 21, 22] затрудняют сравнение данных антиоксидантных свойств кофе из разных исследований.

**Методология**. Цель работы – изучение влияния разных способов приготовления напитков из жареного кофе на показатели их качества и антиоксидантные свойства.

Для исследований в розничной торговле г. Санкт-Петербурга был приобретен кофе молотый арабика средней обжарки «Живой кофе», изготовитель ООО «ЖК ХОЛДИНГ», Россия, из которого приготавливали напитки разными способами в соотношении 7 г кофе / 100 мл воды согласно ГОСТ 34116–2017.

Способы приготовления кофе:

– КС – в капсульной кофемашине *Nescafe Krups Dolse Gusto KP1A3B10* под давлением 15 бар;

– ТС – нагревание на медленном огне до закипания в медной турке;

– ФП – в френч-прессе, заливая горячей водой температурой +95°С с настаиванием в течение 5 минут;

– ХС – в стакане, заливая кофе холодной водой температурой +20°С с настаиванием в течение 24 часов.

В полученных напитках определяли показатели качества – экстрактивные и растворимые сухие вещества (РСВ); активную кислотность; вязкость; колориметрические характеристики. Антиоксидантные свойства определяли по содержанию кофеина, суммы хлорогеновых кислот, суммы полифенолов и антиоксидантной активности (АОА).

Экстрактивные вещества определяли выпариванием в сушильном шкафу при температуре +105°С до постоянной массы и взвешиванием остатка по ГОСТ 32775-2014; РСВ – рефрактометрически по ГОСТ 2173-2013; вязкость – на вибрационном вискозиметре *SV-100*; активную кислотность (*pH*) – на лабораторном *pH*-метре.

Колориметрический анализ экстрактов кофе проводили на спектрофотометре *CM-5 KONICA MINOLTA*. Оценка цвета проводилась в системе *CIE Lab – L** (яркость), координаты цвета – *a** (от зелени [-] до красноты [+]) и *b** (от голубизны [-] до желтизны [+]).

Содержание кофеина, хлорогеновой кислоты и общее содержание полифенолов фильтрованных экстрактов кофе определяли на спектрофотометре «*UNICO-2800*», США. Для определения кофеина экстракт кофе подщелачивали до *pH* 12,5 и экстрагировали хлороформом. Органический слой использовали для измерений при длине волны 276 нм и рассчитывали с учетом фона (310 нм) в пересчете на чистый кофеин [6]. Для определения хлорогеновой кислоты обезжиривание экстракта кофе осуществляли петролейным эфиром, экстрагировали горячей водой, охлаждали на льду, измерения проводили при длине волны 324 нм [8]. Общее содержание полифенолов определяли в результате реакции окисления экстракта кофе реактивом Фолина-Чокальтеу и последующим измерением оптической плотности при длине волны 765 нм согласно ГОСТ Р 55488-2013.

АОА фильтрованных экстрактов кофе определяли на кулонометре «Эксперт-006-антиоксиданты». Титрантом служил электрогенерированный бром, при постоянном токе 50,0 мА из водного 0,2 М раствора бромида калия в 0,1 М растворе серной кислоты с определением времени конца титрования по потенциометрической индикации, которое пересчитывалось в количество электроэнергии в кулонах. Электролитическую ячейку кулонометра калибровали по рутину.

Исследования экстрактов кофе проводили в трехкратной повторности при приготовлении напитка из кофе разными способами. Для статистической обработки экспериментальных данных использовали *Microsoft Excel 2010.*

**Результаты**. Способ приготовления напитков из кофе оказал влияние на содержание экстрактивных и растворимых сухих веществ (РСВ) (табл. 1). Количество экстрактивных веществ варьировало от 19,0% в напитке, приготовленном в френч-прессе (ФП) до 22,0% – в кофе по-турецки (ТС). Такая же динамика была характерна и для РСВ, составляя 0,92–1,22%, и не противоречит опубликованным ранее данным [11, 13]. Но в напитке ХС содержалось РСВ больше, чем в напитке КС на 12,2%, хотя экстрактивных веществ было меньше на 2,9%.

Количество экстрактивных веществ кофе оказало влияние на вязкость напитков, образуя один и тот же ряд в зависимости от способа заваривания: ТС > КС > ХС > ФП. Существенных отличий в значениях *pH* напитков, приготовленных разными способами, не установлено, вероятно, из-за использования одного и того же кофе для заваривания. В большей степени значения *pH* кофе арабика варьируют в зависимости от региона произрастания и по данным [12, 21, 23] могут находиться в пределах 4,80-5,62.

Интенсивность цвета напитков, приготовленных, из кофе арабика средней обжарки разными способами, изменялась незначительно (табл. 2). Самым светлым был напиток ХС (*L*=69,81*), длительный контакт которого с кислородом воздуха при заваривании из-за отсутствия герметичности, могли привести к окислению красящих веществ. По данным [15] кофе за 3 часа настаивания в холодной воде имеет значения *L** в 1,65 раз выше, чем при заваривании горячей водой в течение 6 минут.

Остальные образцы напитков были близки между собой по светлоте *L**, отличаясь значениями на 6,4%, но координаты цвета *a** и *b** имели разное пространственное положение. В напитке КС координата *a** смещалась вправо в сторону красных оттенков по сравнению с напитками ТС и ФП, а в напитке ТС ко-

ордината *b** смещалась в сторону более выраженной желтизны, превышая ее значения для напитков КС и ФП на 11,3 и 19,1%, соответственно.

Напитки, полученные разными способами приготовления, отличались содержанием биологически активных веществ (табл. 3). Кофеин преобладал в напитках ТС и ХС, содержась почти в одинаковых количествах, хлорогеновые кислоты и полифенолы преобладали в напитке ТС, что отразилось на их антиоксидантной активности.

*Таблица 1 – Показатели качества напитков, приготовленных из кофе разными способами (p <0.05)*

| Показатели | Способ приготовления | | | |
|---|---|---|---|---|
| | КС | ТС | ФП | ХС |
| Экстрактивные вещества, % | 21,2 | 22,0 | 19,0 | 20,6 |
| Растворимые сухие вещества, % | 0,98 | 1,22 | 0,92 | 1,10 |
| Вязкость, мПа ‣с | 1,23 | 1,30 | 1,00 | 1,12 |
| pH | 5,11 | 5,12 | 5,12 | 5,14 |

*Таблица 2 – Колориметрические характеристики напитков, приготовленных из кофе разными способами (p <0.05)*

| Показатели | Способ приготовления | | | |
|---|---|---|---|---|
| | КС | ТС | ФП | ХС |
| L* (D65) | 55,76 | 56,74 | 59,34 | 69,81 |
| a* (D65) | 17,20 | 16,45 | 16,84 | 15,27 |
| b* (D65) | 67,64 | 75,29 | 63,22 | 64,49 |

*Таблица 3 – Содержание кофеина, суммы хлорогеновых кислот и полифенолов, и антиоксидантная активность напитков из кофе, приготовленных разными способами (p <0.05)*

| Показатели | Способ приготовления | | | |
|---|---|---|---|---|
| | КС | ТС | ФП | ХС |
| Кофеин, мг / 100 мл | 23,67 | 26,49 | 22,12 | 26,98 |
| Сумма хлорогеновых кислот, мг / 100 мл | 38,30 | 42,65 | 34,28 | 39,75 |
| Сумма полифенолов, мг галловой кислоты / 100 мл | 373,20 | 401,65 | 361,55 | 382,10 |
| Антиоксидантная активность, мг рутина / 100 мл | 287,76 | 343,62 | 276,00 | 307,90 |

Длительная экстракция в течение 24 часов при холодном способе заваривания привела к максимальной экстракции кофеина, что было почти сравнимо с напитком ТС и в 1,4 раза больше, чем в напитке КС. Об эффективности длительности экстракции на содержание кофеина в напитках ХС сообщается в [19, 21]. За 24 часа экстракции в напиток переходит кофеина на 12,7-38,5% больше, чем при экстракции в течение 9 часов. При этом экстракция горячей водой даже в течение 10 минут не позволяет достичь значений, полученных в напитках кофе арабики из разных регионов холодной экстракцией за 24 часа.

В отличие от количества кофеина сумма хлорогеновых кислот в напитках была более высокой – в 1,47-1,62 раз в зависимости от способа приготовления (табл. 3), что получено и другими авторами [12, 19, 24, 27]. Самое высокая сумма хлорогеновых кислот установлена в напитке ТС, приготовленном на медленном огне, хотя при использовании холодного способа их количество было меньше всего на 7,3% и больше на 3,8%, чем в напитке КС. В то же время соотношение кофеин/хлорогеновая кислота в кофе ХС уменьшилось до 1,47 и было самым низким среди напитков, полученных разными способами приготовления, возможно, из-за длительного контакта с кислородом воздуха, способствующем деструкции хлорогеновых кислот, относящихся к полифенолам.

Общее содержание полифенолов в напитках из кофе имело такую же тенденцию, как и сумма хлорогеновых кислот, в зависимости от способов приготовления, образуя ряд: ТС>ХС>КС>ФП. Такая тенденция установлена и другими авторами [27, 28]. Напиток ХС содержал полифенолов всего лишь на 5,1% меньше, чем напиток ТС, зато больше, чем КМ и ФП на 2,4 и 5,7%, соответственно. Следует отметить, что различия в содержании полифенолов между кофе, приготовленными разными способами, меньше чем в содержании хлорогеновых кислот.

Все исследуемые напитки, полученные из кофе разными способами, обладали АОА, значения которых отличались в 1,25 раз. По данным [22] различия между значениями АОА кофе из 21 стран, приготовленных разными способами, определенными амперометрическим способом, наиболее близким к кулонометрическому титрованию, отличались не более чем в 1,5 раза. Наиболее высокой АОА обладал напиток ТС, который содержал самое высокое количество главных антиоксидантов кофе – хлорогеновых кислот и полифенолов, хотя по количеству кофеина немного уступал напитку ХС. АОА кофе эспрессо уступала напитку ХС на 7%, но была выше, чем у напитка ФП на 4,3%.

**Обсуждение.** Использование разных способов приготовления напитков, отличающихся температурой воды для заваривания, продолжительностью и средствами процедуры, из кофе одного сорта одинаковой обжарки и измельчения, могут приводить к разной интенсивности твердожидкостной экстракции. В результате получаются напитки, отличающиеся количеством экстрактивных и растворимых сухих веществ. По данным [11] в кофе, приготовленном на медленном

огне, содержание экстрактивных веществ больше на 16,3%, чем при использовании кофемашины, а количество РСВ отличается на 5%. Повышение температуры воды для заваривания на 10°С (с 88 до 98°С) увеличивает выход экстрактивных веществ на 15,6% [20]. Приготовление кофе холодным способом в течение 7 часов приводит к уменьшению содержания РСВ на 4,3%, чем в кофе, приготовленном в френч-прессе за 6 минут [12]. Все это приводит к различиям в колориметрических характеристиках, содержании биологически активных веществ и антиоксидантной активности напитков, за исключением *pH*.

Отсутствие значительных отличий в значении *pH* исследуемых напитков обусловлено большим влиянием температуры обжарки кофейного зерна, чем способом приготовления напитков из кофе. Более высокая температура обжарки кофе увеличивает значения *pH* на 14%, а температура воды, используемой при заваривании, с холодной до горячей – только на 3-8% [12], оставаясь почти постоянной в зависимости от продолжительности экстракции [21]. Даже при использовании восьми способов приготовления с разным количеством одного вида кофе и воды значения *pH* варьируют в пределах 5,12-5,30 [10].

В процессе обжарки зерно кофе приобретает коричневую окраску разной интенсивности с *L** от 9,0 для кофе арабики темной обжарки до 58,6 для кофе арабики светлой обжарки [24, 25]. При заваривании кофе цвет напитка становится светлее, повышая значения *L** в 2,5-3 раза для эспрессо [26], а для холодного кофе из зерен средней обжарки значения *L** достигают 64,62 [15].

Содержание кофеина в исследуемых напитках независимо от способа заваривания не превышало 26,98 мг/100 мл, что нельзя назвать высоким. Отсутствие информации о стране происхождения кофе образца, использованного для приготовления напитков, не позволяет судить об эффективности экстракции в связи с высокой вариабильностью кофеина в арабике (0,3-2,5%) в зависимости от страны происхождения кофе [4, 14, 18, 19, 21, 24]. Так, по данным [19], в кенийской арабике содержание кофеина может составлять около 0,3% и при заваривании с учетом его экстракции около 70%, в 100 мл напитка из 7 г кофе будет содержаться только 14,7 мг/100 мл кофеина.

Скорость экстракции кофеина связана с температурой воды, используемой при заваривании. В воде комнатной температуры 20°С кофеин умеренно растворим (1,46 мг/мл), но повышение температуры до 80°С увеличивает его растворимость более чем в 10 раз (180 мг/мл). Максимальной растворимостью кофеин обладает при 100°С (670 мг/мл) [10]. Во всех способах приготовления напитков кроме ХС использовали горячую воду (ТС, ФП) или перегретый пар (КМ), и количество кофеина в напитках зависело от длительности контакта кофе с горячей водой. Из них максимально кофеина содержалось в напитке ТС, при приготовлении которого постоянный контакт с горячей водой длился около 5 минут. В отличие от него при приготовлении напитка ФП, при такой же продолжительности контакта с горячей водой происходило постепенное остывание температуры воды, что привело к снижению количества кофеина на 19,7%, что меньше чем в исследованиях [24], где снижение температуры воды до 93°С с настаиванием в течение 5 минут уменьшает экстракцию кофеина на 35% по сравнению с приготовлением кофе по-турецки.

При использовании горячей воды для приготовления напитков экстракция как кофеина, так и суммы хлорогеновых кислот происходит в первые минуты. При способе ХС их экстракция происходит постепенно, и через 6-10 часов только количество кофеина выходит на уровень горячего заваривания, а через 24 часа даже превышает. Экстракция суммы хлорогеновых кислот происходит более медленно и даже через 24 часа может не достигнуть уровня горячего заваривания [12, 19, 25]. По данным [25] содержание суммы хлорогеновых кислот при горячем заваривании кофе капельным методом *V60* в 1,5 раза выше, чем при использовании холодного способа с настаиванием 24 часа.

Многочисленные исследования показывают роль природных антиоксидантов в формировании антиоксидантных свойств кофе [3, 14, 19, 22, 24]. По данным [22] высокой *AOA in vitro u in vivo* обладает 5-О-кофеоилхиновая кислота, количество которой составляет более 50% суммы хлорогеновых кислот [10, 19, 25]. Кофеин тоже обладает *AOA*, но по сравнению с 5-О-кофеоилхиновая кислотой она ниже *in vitro* на 27%, а *in vivo* – более чем в 10 раз [22].

Множество исследований показывают влияние полифенолов на *AOA* напитков, приготовленных из кофе. По данным Brezová et al. [3] зависимость (r) между содержанием полифенолов и *AOA*, определенной методом *DPPH*, составляет 0,9219, методом *ABTS* – 0,7289. В другой работе [14] *AOA* определяли методом *FRAP* и *DPPH* и установили взаимосвязь (*r*) с содержанием полифенолов 0,852 и 0,941, соответственно. Однако, нельзя однозначно утверждать о влиянии способа приготовления напитков из кофе на содержание полифенолов, не учитывая страну происхождения зерна кофе. По данным [21] в бразильской и индийской арабике при заваривании горячей водой содержание полифенолов увеличивается по сравнению с холодным способом, колумбийской арабике – уменьшается, а перуанской арабике – не изменяется. Другим фактором, влияющем на содержание полифенолов, является степень обжарки. Потери полифенолов при сильной обжарке кофе достигают 32%, а разница потерь между легкой и сильной обжаркой – до 25%. При этом *AOA* меньше зависит от режима обжарки (2,2-12,9%), что авторы связывают с образованием меланоидинов (промежуточные продукты меланоидинообразования), проявляющих антиоксидантные свойства [4].

**Выводы.** Результаты проведенных исследований показали роль способов приготовления в формировании антиоксидантных свойств и показателей качества напитков из кофе. Наиболее эффективным из четырех

исследованных способов приготовления для получения напитка с максимальными антиоксидантными свойствами является приготовление на медленном огне по-турецки (ТС). В результате твердожидкостной экстракции при постоянном контакте частиц кофе с горячей водой в напитке ТС происходит наибольшее извлечение: экстрактивных и растворимых сухих веществ, изменяя пространственное положение координат цвета; биологически активных веществ – кофеина, суммы хлорогеновых кислот и полифенолов, которые способствуют формированию *АОА* получаемого напитка. Влияние экстрактивных веществ на количество природных антиоксидантов и значения *АОА* прослеживается только при использовании в процессе приготовления горячей воды (ТС, ФП) или перегретого пара (КМ). Использование холодного способа позволяет максимально извлечь только кофеин, а длительность процесса экстракции способствует деструкции хлорогеновых кислот и полифенолов, уменьшая их количество в напитке, в результате он по *АОА* уступает напитку ТС.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Freitas V.V., Borges L.L.R., Ribeiro Vidigal M.C.T., dos Santos M.H., Stringheta P.C. Coffee: A comprehensive overview of origin, market, and the quality process // Trends in Food Science & Technology. – 2024. – № 146. – 104411.

2. Елисеев М.Н., Косарева О.А. Мировой и отечественный рынки кофе: тенденции и перспективы развития // Вестник академии. – 2023. – № 3. – С. 124-131.

3. Brezova V., Šlebodova A., Staško A. Coffee as a source of antioxidants: An EPR study // Food Chemistry. – 2009. – №114. – P. 859-868.

4. Dybkowska E., Sadowska A., Rakowska R., Dębowska M., Świderski F., Świąder K. Assessing polyphenols content and antioxidant activity in coffee beans according to origin and the degree of roasting // Rocz Panstw Zakl Hig. – 2017. – № 68(4). – P. 347-353.

5. Açıkalın B. Sanlier N. Coffee and its effects on the immune system // Trends in Food Science & Technology. – 2021. – № 114. – P. 625-632.

6. Liczbiński P., Bukowska B. Tea and coffee polyphenols and their biological properties based on the latest in vitro investigations // Industrial Crops & Products 2022. – № 175. – 114265.

7. Al-Fawaeir S., Alawneh Ja. M., Al-Odat I. Influence of coffee consumption on serum lipid profile parameters: Can coffee consumption lead to health consequences in humans? // Journal of Agriculture and Food Research. – 2023. – №14. – 100904.

8. Montenegro Jú., dos Santos L.S., de Souza R.G.G. [et al.] Bioactive compounds, antioxidant activity and antiproliferative effects in prostate cancer cells of green and roasted coffee extracts obtained by microwave-assisted extraction (MAE) // Food Research International. – 2021. – №140. – 110014.

9. Tsoi B., Yi R.N., Cao L.F. [et al.] Comparing antioxidant capacity of purine alkaloids: A new, efficient trio for screening and discovering potential antioxidants in vitro and in vivo // Food Chemistry. – 2015. – № 176. – P. 411-419.

10. Angeloni G., Guerrini L., Masella P., Bellumori M., Daluiso S., Parenti A., Innocenti M. What kind of coffee do you drink? An investigation on effects of eight different extraction methods // Food Research International. – 2019. – № 116. – P. 1327-1335.

11. Лашманова Л.А., Ибрагимова Р.Ю., Борисова А.В. Влияние способов заваривания кофе на органолептические и физико-химические свойства // Вестник КрасГАУ. – 2023. – № 3. – С. 181-187.

12. Rao N.Z., Fuller M., Grim M.D. Physiochemical characteristics of hot and cold brew coffee chemistry: The effects of roast level and brewing temperature on compound extraction // Foods. – 2020. – № 9. – 902.

13. Ranić M., Konić-Ristić A., Takić M., Glibetić M., Pavlović Z., Pavlović M., Dimitrijević-Brankovic S. Nutrient profile of black coffee consumed in Serbia: Filling a gap in the food composition database // Journal of Food Composition and Analysis. – 2015. – № 40. – P. 61-69.

14. Miłek M., Młodecki Ł., Dżugan M. Caffeine content and antioxidant activity of various brews of specialty grade coffee // Acta Sci. Pol. Technol. Aliment. – 2021. – № 20(2). – P. 179-188.

15. Caudill M., Osborne Ja., Sandeep K.P., Simunovic Jo., Harris G. K. Viability of microwave technology for accelerated cold brew coffee processing vs conventional brewing methods // Journal of Food Engineering. – 2022. – № 317. – 110866.

16. Macheiner L., Schmidt A., Schreiner M., Mayer H.K. Green coffee infusion as a source of caffeine and chlorogenic acid // Journal of Food Composition and Analysis. – 2019. – № 84. – 103307.

17. Lin Yu-W., Lu W.Ch., Liao Ch.H., Huang P.H. Innovative coffee filter cups enhance pour-over coffee quality while providing bioactive benefits – Challenges and opportunities // Journal of Agriculture and Food Research. – 2024. – № 15. – 101024.

18. Ludwig I.A., Mena P., Calani L., Cid C., Del Rio D., Leand M.E.J., Crozie A. Variations in caffeine and chlorogenic acid contents of coffees: what are we drinking? // Food Funct. – 2014. – № 5. – P. 1718-1726.

19. Fuller M., Rao N.Z. The effect of time, roasting temperature, and grind size on caffeine and chlorogenic acid concentrations in cold brew coffee // Scientific Reports. – 2017. – № 7 (1). – 17979.

20. Andueza S., Vila M., de Peña M.P, Cid C. Influence of coffee/water ratio on the final quality of espresso coffee // Journal of the Science of Food and Agriculture. – 2007. – 87. – P. 586-592.

21. Muzykiewicz-Szymańska A., Nowak A., Wira D., Klimowicz A. Parameters on antioxidant activity and caffeine content in infusions of roasted and unroasted arabica coffee beans originated from different countries // Molecules. – 2021. – № 26. – 3681.

22. Yashin A., Yashin Ya., Wang Ji.Yu., Nemzer B. Antioxidant and antiradical activity of coffee. Review // Antioxidants. – 2013. – № 2. – P. 230-245.

23. Jeon J.S., Kim H.T., Jeong I.H. [et al.] Determination of chlorogenic acids and caffeine in homemade brewed coffee prepared under various conditions // Journal of Chromatography B. – 2017. – № 1064. – P. 115-123.

24. Alamri E., Rozan M., Bayomy H. A study of chemical composition, antioxidants, and volatile compounds in roasted Arabic coffee // Saudi Journal of Biological Sciences. – 2022. – № 29. – P. 3133-3139.

25. Herawati D., Armawan M.S., Nurhaliza N. [et al.] Impact of bean origin and brewing methods on bioactive compounds, bioactivities, nutrition, and sensory perception in coffee brews: An Indonesian coffee gastronomy study // International Journal of Gastronomy and Food Science. – 2024. – № 35. – 100892.

26. Lopes G.R., Passos C.P., Petronilho S. [et al.] Carbohydrates as targeting compounds to produce infusions resembling espresso coffee brews using quality by design approach // Food Chemistry. – 2021. – № 344. – 128613.

27. Péréz-Martinez M., Caemmerer B., Paz de Peńa M. [et al.] Influence of brewing method and acidity regulators on the antioxidant capacity of coffee brews // J. Agric. Food Chem. – 2010. – № 58. – P. 2958-2965.

28. Lapčíková B., Lapčík L., Barták P., Valenta T., Dokládalová K. Effect of Extraction Methods on Aroma Profile, Antioxidant Activity and Sensory Acceptability of Specialty Coffee Brews // Foods. – 2023. – № 12. – 4125.

*Статья поступила в редакцию 09.05.2024*
*Статья принята к публикации 17.06.2024*

УДК 664.38:635.656
EDN: VBBMUB

# МЕТОДЫ ЭКСТРАКЦИИ И МОДИФИКАЦИИ ИЗОЛЯТА ГОРОХОВОГО БЕЛКА, ВЛИЯНИЕ НА СВОЙСТВА

© Автор(ы) 2024

SPIN: 7452-2380
AuthorID: 132758
ORCID: 0000-0002-7039-4047
ResearcherID: B-4276-2017
ScopusID: 51190430543

**ЧУГУНОВА Ольга Викторовна,** доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой технологии питания Института менеджмента, предпринимательства и инжиниринга
*Уральский государственный экономический университет*
*(620144, Екатеринбург, ул. 8 Марта, д. 62, e-mail: chugun.ova@yandex.ru)*

SPIN: 3158-4085
AuthorID: 1094399
ORCID: 0000-0002-1285-4797

**БИКБУЛАТОВ Павел Станиславович,** аспирант
*Уральский государственный экономический университет*
*(620144, Екатеринбург, ул. 8 Марта, д. 62, e-mail: bikbulatovpavel@mail.ru)*

SPIN: 2615-4939
AuthorID: 881294
ORCID: 0000-0001-5458-8565

**ЗАВОРОХИНА Наталия Валерьевна,** доктор технических наук,
профессор кафедры технологии питания Института менеджмента, предпринимательства и инжиниринга
*Уральский государственный экономический университет*
*(620144, Екатеринбург, ул. 8 Марта, д. 62, e-mail: ip@usue.ru)*

**Аннотация**. В настоящее время наблюдается увеличение спроса на продукты растительного происхождения с более высокой пищевой ценностью, что позволяет упростить контроль за рационом и потреблением пищи. Растительные белки обладают большим потенциалом для использования в пищевой промышленности, особенно при создании заменителей мяса и морепродуктов, так как они доступны и экологически устойчивы. Цель исследования – поиск решений и оценка имеющихся подходов к технологиям модификации горохового белка, включая такие этапы как: химическая, физическая и биологическая модификация. В ходе проведения исследования проведен отбор первоисточников, найденных на специализированных сайтах научных публикаций, а также в отечественных и международных реферативных базах данных. Показаны основные зависимости и ограничения, определенные в зависимости от применяемых методов и достигаемых эффектов в процессе модификации. Использование метода ультразвукового воздействия и последующее формирование суспензий для обработки анализируемых образцов различными ферментами: *Alcalase 2,4 FG L, Shearzym 500 L, AMG 300 L, Fungamyl 800 L, Viscoferm L*, проводили в каждой стадии при различных концентрациях, продолжительности и *pH*. Комбинация различных методов получение суспензии с содержанием различных примесей, снижающих общую чистоту получаемого продукта, предполагает очистку и выделение максимальной концентрации молекул белка. Благодаря методу осаждения и его сочетания с добавлением лактата кальция, позволяет достигнуть максимально возможного результата в лабораторных условиях. Помимо использования традиционного метода получения белкового концентрата, внедрение лактата кальция как дополнительного компонента в суспензии, обеспечивает образование и стабилизацию частиц горохового протеина благодаря солевым мостикам, индуцированных ионами *Ca*, за счет гидрофобного взаимодействия и водородных связей.

**Ключевые слова**: модификация белка, гороховый белок, изоляты горохового белка, методы.

# METHODS OF MODIFICATION OF PEA PROTEIN ISOLATE, EFFECT ON PROPERTIES

© Author(s) 2024

**CHUGUNOVA Olga Viktorovna**, doctor of technical sciences, professor,
head of the Department of Nutrition Technology at the Institute of Management, Entrepreneurship and Engineering
*Ural State University of Economics*
*(62, 8 Marta str., Yekaterinburg, 620144, e-mail: chugun.ova@yandex.ru)*
**BIKBULATOV Pavel Stanislavovich**, graduate student
*Ural State University of Economics*
*(620144, Ekaterinburg, 8 Marta St., 62, e-mail: bikbulatovpavel@mail.ru)*
**ZAVOROKHINA Natalia Valerievna,** doctor of technical sciences,professor of the Department of Food Technologies of the Institute of Management, Entrepreneurship and Engineering

*Ural State University of Economics*
*(620144, Ekaterinburg, 8 Marta St., 62, e-mail: ip@usue.ru)*

**Abstract.** Currently, there is an increasing demand for plant-based products with higher nutritional value, which makes it easier to control diet and food intake. Plant proteins have great potential for use in the food industry, especially in the creation of meat and seafood substitutes, as they are available and environmentally sustainable. The aim of the study is to find solutions and evaluate available approaches to pea protein modification technologies, including steps such as: chemical, physical and biological modification. During the study, a selection of primary sources found on specialized sites of scientific publications, as well as in domestic and international abstract databases was carried out. The main dependencies and limitations identified depending on the methods used and the effects achieved in the modification process are shown. The use of the ultrasonic exposure method and the subsequent formation of suspensions for the treatment of analyzed samples with various enzymes: *Alcalase 2,4 FG L, Shearzym 500 L, AMG 300 L, Fungamyl 800 L, Viscoferm L*, was carried out in each stage at different concentrations, duration and *pH*. The combination of various methods for obtaining a suspension containing various impurities that reduce the overall purity of the resulting product involves purification and isolation of the maximum concentration of protein molecules. Thanks to the precipitation method and its combination with the addition of calcium lactate, it allows you to achieve the maximum possible result in laboratory conditions. In addition to using the traditional method of obtaining protein concentrate, the introduction of calcium lactate as an additional component in the suspension ensures the formation and stabilization of pea protein particles due to salt bridges induced by *Ca* ions, due to hydrophobic interaction and hydrogen bonds.

**Keywords:** protein modification, pea protein, pea protein isolate, methods.

***Для цитирования:*** *Чугунова О.В. Методы экстракции и модификации изолята горохового белка, влияние на свойства / О.В. Чугунова, П.С. Бикбулатов, Н.В. Заворохина // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 2(66). – С. 106-113. – EDN: VBBMUB.*

**Введение.** Проблема недостатка продовольствия для растущего населения Земли представляет собой одну из важнейших глобальных проблем, стоящих перед человечеством. Необходимо обратить внимание не только на количество производимых продовольственных ресурсов, но и на их качество, особенно биологическую ценность белка, который является важным макронутриентом для выживания человека и напрямую влияет на здоровье и иммунную систему организма [1,2]. Один из основных трендов в пищевой промышленности заключается в создании продуктов, сочетающих высокое качество с учетом принципов экологической чистоты и энергетической сбалансированности [3].

В настоящее время наблюдается увеличение спроса на продукты растительного происхождения с более высокой пищевой ценностью, что позволяет упростить контроль за рационом и потреблением пищи. Растительные белки обладают большим потенциалом для использования в пищевой промышленности, особенно при создании заменителей мяса и морепродуктов, так как они доступны и экологически устойчивы. Проведенные исследования показывают, что бобовая мука и изолят белка обладают отличными функционально технологическими свойствами, которые можно использовать при производстве разнообразных продуктов питания. Горох и другие бобовые, благодаря высоким показателям питательных веществ в составе, являются хорошими источниками белков, клетчатки, крахмала, витаминов и минералов. При этом они также имеют высокий уровень фитохимических веществ (галактозиды, сапонины, фитаты, фенолы, лектины или ингибиторы протеазы), способных оказывать позитивное влияние на здоровье человека [4].

На ранних стадиях развития рынка растительных белков наиболее распространенным продуктом, используемого в производстве альтернативы белка животного происхождения, была соя. В данный момент, на территории России существуют действующие предприятия, изготавливающие соевый белок в различных формах. Однако стоит отметить, что несмотря на свою биологическую ценность и широкий спектр применения, популярность соевого белка снижается, поскольку все чаще отмечается, что он может вызывать аллергию и являться причиной образования целого ряда заболеваний, ввиду частого использования ГМО для их взращивания. Ввиду данных обстоятельств потребители начинают все чаще отдавать предпочтение другим источникам белка, наиболее перспективным из которых на сегодняшний день признан горох.

Среди широкого ассортимента различных растений, в наибольшей степени интерес вызывают бобовые, а в частности горох, являющийся популярным продуктом, используемый в пищевой промышленности как компонент в составе изделий и как отдельный продукт с высокой пищевой и биологической ценностью. Популярность данного продукта, как и большинства других растительных белков обуславливается: высокими перспективами выращивания растительных культур с высоким содержания белка и имеющих широкий спектр применения и обладающих возможностью для экспорта большого объема для различных мировых стран. На основе предварительно полученных данных Росстат зафиксировал, что за 2023 год, на территории России, общая посевная площадь, выделенная под горох, составляет около 1899,6 тыс. га, что на 17,1% превышает показатели 2021 года и является рекордным значением начиная с 1993 года [5].

Изолят горохового белка гипоаллергенен и не

содержит глютен и лактозу. При этом в нем есть незаменимые аминокислоты, железо и минеральные вещества (медь, марганец, фосфор и железо) [5]. По количеству аргинина гороховый протеин превосходит сою, яичный белок, казеин и сывороточный белок, а по содержанию аминокислот группы BCAA он сравним с казеином.

Благодаря своим высоким пищевым показателям и различным физико-химическим показателям, изолят горохового белка является продуктом с широким спектром применения при производстве различных продуктов питания.

Возможности применения изолята горохового белка в производстве различных пищевых продуктов продуктах, представлены в таблице 1 [6-8].

Гороховый белок особенно востребован в продуктах премиум-класса, предназначенных для обеспеченных потребителей, которые активно ищут продукты с «натуральной и чистой этикеткой». Благодаря своим уникальным физико-химическим характеристикам, изолят горохового белка способен оказывать влияние на свойства готовых пищевых продуктов и различных полуфабрикатов. Так, благодаря возможности связывать ингредиенты вместе, текстурированный изолят горохового белка способен улучшить текстуру и стабильность структуры пищевых продуктов. При этом, текстурированный гороховый белок возможно использовать в составе продуктов, для которых необходимо получение волокнистой и жевательной текстуры готового продукта [5,8].

*Таблица 1 – Применение изолята горохового белка в пищевых продуктах*

| Категория | Применение |
|---|---|
| Пищевые добавки /Спортивное питание | Гороховый протеиновый порошок, энергетические смеси с высоким содержанием белка |
| Напитки | Протеиновые напитки, другие безалкогольные напитки |
| Кондитерские изделия | Батончики с высоким содержанием белка, шоколад |
| | Торт, печенье, выпечка |
| Веганские альтернативы | Аналоги мяса, альтернативное молоко |
| Молочная промышленность | Мороженое, молочные напитки |
| Мясная промышленность | Мясорастительные полуфабрикаты |
| Пищеконцентратная промышленность | Протеиновые каши |

Цель исследования – осуществить поиск и оценить существующие возможные способы экстракций и модификаций горохового белка, включая такие этапы как: химическая, физическая и биологическая модификация.

**Методология.** В ходе проведения исследования проведен анализ информации ранее проведенных исследований по теме данной работы, являющихся первоисточниками для дальнейших возможных поисков решения проблем и развития данной отрасли. Анализ имеющихся данных по данной теме был осуществлен благодаря библиотеке работ, опубликованных на отечественных и международных сайтах научных публикаций: *WoS, Scopus, Global Health, PubMed, eLIBRARY.RU, Lancet, ScienceDirect, Elsevier, ResearchGate и ScienceDaily*, за период с 2020 по 2023 гг. В основе проведения исследований были выбраны материалы, соответствующие научной достоверности и полноты полученных данных.

В процессе проведения работы были использованы различные методы для анализа и построения технологического процесса: структурно-логические, аналитические и аксиоматические. При этом основной для анализа первоисточников был традиционный контент-анализ обзорных статей, исследований и патентов, проводимый в рамках кабинетного исследования [9,10].

Для определения физико-химических показателей были использованы традиционные методы исследования.

Массовую долю влаги в белковых концентратах определяли по ГОСТ 13586.5-93; общего белка – по методу Кьельдаля (Nx6,25) по ГОСТ 10846-91, крахмала – по ГОСТ 10845-98; клетчатки – по ГОСТ 31675-2012; золы – по ГОСТ 27494-2016; жира – с диэтиловым эфиром по ГОСТ 29033-91; углеводов – по разнице между 100 % и суммой остальных компонентов.

В основе экстракционного метода получения изолята белка гороха был использован метод ультразвуковой обротки на аппарате *Soniprep 150 ME* (Mse Ltd., Великобритания). В стаканчики наливали 80 мл гомогенной мучной суспензии, помещали в камеру с ванной со льдом, в которую опускали зонд. После чего суспензию центрифугировали при 6000 мин$^{-1}$ и определяли белок по методам Къельдаля.

В основе ферментативного метода лежало использование различных ферментативных препаратов и последующего их осаждения с целью получения обогащенных белковых продуктов. Для растворения белков использовали уксусную (ГОСТ 61-75), соляную (ГОСТ 3118-77) кислоты, хлорид натрия (ГОСТ 13830-97), этанол (ГОСТ 18300-72),гидроксид натрия (ГОСТ 2263-79); ФП компании "*Novozymes*" (Дания): *Shearzym 500 L* с ксиланазной ктивностью 500 ед/г, *Viscoferm L* с целлюлолитической активностью 600 ед/г; *Fungamyl 800 L* – источник *α*-амилазы; *AMG 300 L 2500* – источник глюкоамилазы; *Alcalase 2,4 L FG* – источник протеаз; трансглютаминазу фирмы «Фарма Ингредиентс» с активностью 100 ед (мТГ).

**Результаты.** Основные технологические параметры получения белкового изолята растительных продуктов, представлены в таблице 2, выбор параметров осуществлялся с учетом рекомендаций [6, 7, 9].

Использование метода ультразвукового воздействия и последующее формирование суспензий для обработки анализируемых образцов различными ферментами: *Alcalase 2,4 FG L, Shearzym 500 L, AMG 300 L, Fungamyl 800 L, Viscoferm L*, происходило в каждой стадии при различных концентрациях, продолжительности и *pH*. Сочетание различных методов экстракции позволяет произвести раскрытие большего количества белковых молекул и получения продукта более высокой чистоты. Условия и параметры ферментативной обработки представлены в таблице 3 и 4 [6, 9, 10].

В качестве источника протеаз использовали ферментный препарат *Alcalase 2.4 L* с активностью протеаз 2,4 ед/г. *Alcalase 2,4 FG L* гидролизуют белок в середине молекулы, образуя пептиды более или менее одинакового размера при добавлении молекулы воды к пептидной связи, чем можно объяснить более высокий переход белка в раствор.

Помимо использования традиционного метода получения белкового изолята, внедрение лактата кальция как дополнительного компонента в суспензии, позволяет образование и стабилизацию частиц горохового протеина благодаря солевым мостикам, индуцированных ионами *Ca*, за счет гидрофобного взаимодействия и водородных связей [11].Технологические параметры осаждения белковой суспензии методом центрифугирования, представлены в таблице 5, учитывались параметры, указанные в исследованиях [6, 9, 11, 12].

*Таблица 2 – Технологические параметры получения белкового изолята из гороховой муки ультразвуковым методом*

| Технологические параметры получения | Образец исследования |
|---|---|
| Подготовка сырья методом измельчения | |
| Средневзвешенный размер частиц муки, мкм | 102±9 |
| Экстракционный метод получения ультразвуковым воздействием на аппарате Soniprep 150 ME | |
| Мощность ультразвуковых волн, Вт | 150 |
| Амплитуда ультразвуковой волны, мкм | 10±2 |
| Продолжительность ультразвукового воздействия, мин | 3±0,6 |

*Таблица 3 – Технологические параметры обработки гороховой муки, методом ферментативной обработки, после ультразвукового воздействия*

| Условия метода ферментативной обработки, после ультразвукового воздействия | |
|---|---|
| Гидромодуль | 1:15 |
| Температура, °С | 55±6 |
| Скорость перемешивания суспензии, мин$^{-1}$ | 165±6 |

*Таблица 4 – Технологические параметры обработки гороховой муки, методом ферментативной обработки*

| Стадия ферментации | Вид ферментного препарата/ мультиэнзимной композиции | Показатели | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Концентрация ФП, % к массе белка | Продолжительность ферментации, ч | pH суспензии |
| I стадия | (Fungamyl 800 L, Viscoferm L) (соотношение 1/1) | 1,5 | 4 | 5,9 |
| II стадия | (Shearzym 500 L, AMG 300 L) (соотношение 1/1) | 1,5 | 4 | 5,1 |
| III стадия | (Alcalase 2,4 FG L) | 1,0 | 2 | 8,0 |

*Таблица 5 – Технологические параметры осаждения белковых суспензий методом центрифугирования*

| Центрифугирование суспензии / экстракта, мин$^{-1}$ | 5750±250 |
|---|---|
| Концентрация лактата кальция, % к массе экстракта | 1,0±0,2 |
| Концентрация мТГ, ед./г СВ экстракта | 4,29±0,4 |
| pH изоэлектрической точки (PI) | 4,2±0,2 |

На основе представленных выше технологических параметров получения изолята горохового белка и по завершению осаждения белков в их изоэлектрической точке при *pH* 4,2±0,05, было достигнуто содержание экстракта растительного белка с массовой долей белка 79,8±0,5%. Поскольку около 37-44% растительного белка имеют более низкую молекулярную массу 16-19 кДа, с целью повышения степени осаждения белков был использован способ обработки лактатом кальция. Использование 1% лактата кальция приводило к выпадению осадка на 38,2% больше, в сравнении с результатами контрольного образца, что дало общий выход в 64,95% от содержания в исходном сырье [12, 13].

Результаты определения содержания белка и других компонентов в исследуемых образцах, на различных этапах лабораторного производства изолята горохового белка и сравнение с коммерческими изолятами [7, 14, 15], представлены в таблице 6.

Определение химического состава, органолептических и функциональных свойств горохового изолята полученных в результате лабораторной экстракции методом обработки раствором 0,05 моль *NaOH* при pH 11 проводили в сравнении с изолятами промышленного производства различных фирм «*Roquette*», «*Cosucra*». По массовой доле экстрагируемого растительного белка в составе анализируемого продукта,

относился к группе «Концентраты». По результатам сравнения различных изолятов горохового белка было определено, что содержание белка в анализируемом продукте полученным лабораторным методом, было на уровне или превышало содержание в коммерческих изолятах.

Основные потребительские характеристики и физико-химические показатели коммерческого изолята горохового белка представлены в таблице 7.

При этом стоит отметить, что помимо анализа объема производства и общей пищевой ценности растительных белков, был проведен анализ технических аспектов в области их модификаций с целью повышения технологических свойств. Под модификацией белков подразумевается процесс изменения его молекулярной структуры или химической группы, как способ повышения уровня функциональных свойств, что способствует росту их возможного применения в качестве компонента в различных пищевых продуктах. Ниже представлены различные методы модификации изолята горохового белка и их влияние на свойства (табл. 8) [13, 14, 16].

*Таблица 6 – Химический состав белковых продуктов на основе гороха*

| Показатели | Гороховый белковый изолят | | | Коммерческие гороховые изоляты | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Способ получения | | | | |
| | Обработка ферментными продуктами, осаждение в $pH_I$ | Обработка ферментными продуктами +осаждение в $pH_I$ с лактатом Са и мТГ | Обработка 0,05 н NaOH | Roquette Nutralys S85F | Cosucra Pisane C9 |
| Влага, % | 3,8±0,2 | 9,2±0,4 | 2,5±0,2 | 6,6±0,1 | 6,8±0,1 |
| Белок, % | 74,4±0,4 | 78,1±0,2 | 79,8±0,5 | 77,6±0,2 | 78,2±2,1 |
| Зола, % | 3,6±0,1 | 3,0±0,1 | 2,4±0,1 | 4,6±0,1 | 6,3±0,1 |
| Жиры, % | 4,5±0,3 | 1,8±0,2 | 3,0±0,3 | 0,6±0,1 | 0,4±0,8 |
| Углеводы, % | 17,6±0,8 | 9,2±0,4 | 10,3±0,8 | 17,3±0,4 | 15,1±2,2 |

*Таблица 7 – Основные потребительские характеристики и физико-химические показатели изолята горохового белка*

| Свойство | Характеристики |
|---|---|
| Физическая форма | Тонкодисперсный порошок |
| Внешний вид | Бело-бежевый порошок |
| Плотность | 0,4 кг/л |
| Растворимость в воде | 664 – 995 г/кг при pH 8,0 |
| pH (10% раствор) | 7,0 – 8,0 |
| Условия хранения | t > 25 °C и W > 65 % |
| Срок годности | 24 месяца |

*Таблица 8 – Методы модификации изолята горохового белка и влияние на свойства*

| Категория | Метод обработки | Модифицированные характеристики |
|---|---|---|
| Физическая модификация | Обработка высоким давлением (HPP) | Структурные изменения, стабильность пенообразования и улучшение эмульгирующих свойств. |
| | Термическая обработка сдвигом (экструзия) | Улучшает текстуру белка. |
| | Плазменная обработка при холодном атмосферном давлении | Улучшает растворимость, эмульгирующую способность и водоудерживающую способность. |
| | Ультразвуковая обработка | Улучшает гелеобразующие свойства и повышает растворимость. |
| Химическая модификация | Гликирование | Помогает уменьшить привкус бобов. |
| | Ацилирование | Помогает улучшить растворимость, стабильность эмульсии, водоудерживающую способность и пенообразующие свойства. |
| | Деамидирование | Улучшает растворимость и уменьшает неприятный привкус бобов, горечь и комковатость. |
| Биологическая модификация | Ферментация | Улучшает усвояемость белка. |
| | Ферментативная модификация | Улучшает растворимость, гидрофобность, эмульгирующие и пенообразующие свойства белка. |

**Обсуждение.** Современные исследования методов экстракции и модификаций белков растительного происхождения показывают существенное повышение их конкурентоспособности в сравнении с белками животного происхождения и возможность построения современного рынка пищевых добавок, позволяющего создать продукты высокого качества и с высокой биодоступностью для различных задач потребителя.

По результатам анализа информационных источников, было выявлено и определено, что к основным методам традиционного экстрагирования можно отнести: сухое фракционирование, влажную экстракцию (щелочную) и солевую экстракцию (ми-

целлизацию) [12, 17, 18]. При этом при посторонних исследованиях, направленного на переработку гороховой муки и получения белкового концентрата, общая методика и технология получения была построена на комбинации технического и биохимического метода [19, 20].

Комбинация различных методов и получение суспензии с содержанием различных примесей, снижающих общую чистоту получаемого продукта, предполагает очистку и выделение максимальной концентрации молекул белка. Таким образом благодаря методу осаждения и его сочетания с добавлением дополнительных компонентов, позволяет достигнуть максимально возможного результата в лабораторных условиях. Помимо использования традиционного метода получения белкового концентрата, внедрение лактата кальция как дополнительного компонента в суспензии, позволяет образование и стабилизацию частиц горохового протеина благодаря солевым мостикам, индуцированных ионами *Ca*, за счет гидрофобного взаимодействия и водородных связей [21, 22].

Результаты проведенных исследований, на основе разработанных технологических параметрах получения изолята горохового белка, по завершению осаждения белков в их изоэлектрической точке при *pH* 4,2±0,05, при использовании 1% лактата кальция показали, что происходит выпадение осадка на 38,2% больше, в сравнении с результатами контрольного образца, что дает общий выход в 64,95% от содержания в исходном сырье, что согласуется с исследованиями Santos M.D. & [et.] и Tanger C. & [et.] [16,18].

По результатам сравнения различных изолятов горохового белка было определено, что содержание белка в анализируемом продукте полученным лабораторным методом, превышало содержание в коммерческих изолятах.

На следующем этапе помимо анализа объема производства и общей пищевой ценности растительных белков, был проведен анализ технических аспектов в области их модификаций с целью повышения технологических свойств. Под модификацией белков подразумевается процесс изменения его молекулярной структуры или химической группы, как способ повышения уровня функциональных свойств, что способствует росту их возможного применения в качестве компонента в различных пищевых продуктах.

*Обработка высоким давлением.* Технология нетермической обработки, используемая высокое давление (200-700 МПа) с целью разрушения нековалентных связей. Таким образом, в условиях высокого давления происходила денатурация белка гороха. При этом по сравнению с термической обработкой, образцы, обработанные данной технологии, образуют более слабые связи между молекулами при той же концентрации, несмотря на то, что высокое давление приводит к большей степени денатурации и агрегации белков.

*Низкочастотная и высокая интенсивность ультразвуковая обработка.* Данная технология, использует акустическую кавитацию для модификации физико-химической структуры и улучшения функциональных свойств белков. Ультразвуковая кавитация – это быстрое образование и схлопывание пузырьков газа, вызванное локализованными перепадами давления, в течение коротких промежутков времени. Таким образом, исследования данного метода свидетельствовали об уменьшении размера белковых частиц при обработке ультразвуком и увеличению гидрофобности поверхности. Данное явление было объяснено увеличением гидрофильности белковых молекул, поскольку это могло привести к изменениям в *3D*-структуре белка, раскрывая более заряженные группы [6, 10, 11].

*Холодная атмосферная плазма.* Данный метод использует ионизированный газ, состоящий в основном из высоковозбужденных ионов, реактивных частиц, а также ультрафиолетового излучения, генерируемого в широком диапазоне температур и давлений осуществляемого за счет сочетания источников тепловой, механической, ядерной и электрической энергии. Обработка горохового белка данным методом повышает гидрофобность, эмульгирующие свойства и гелеобразование. При этом стоит отметить, что также увеличивается гидрофобность поверхности, что приводит к улучшению функциональности изолята. Обработанный гороховый белок образует стабильную межфазную пленку, улучшая стабильность эмульсии [6, 10, 11].

*Гликозилирование белка.* В щадящих условиях конденсация между аминогруппами белков и карбонильными группами полисахаридов происходит посредством ковалентной связи с образованием белково-полисахаридного конъюгата, при котором вся молекулярная структура и исходные функциональные свойства белка не изменяются, а улучшаются. Обработка гуммиарабиком дополнительно подчеркнула важность времени инкубации для повышения уровня растворимости. В ранее проведенных исследованиях было отмечено увеличение растворимости горохового изолята вплоть до времени инкубации 3 суток. При этом исследование структуры конъюгатов методом сканирующей электронной микроскопии показало, что улучшение растворимости, обусловлено увеличением неоднородности и общей сегментации белковых гранул, в то время как нативные гранулы горохового белка имели сферическую форму и отметились общим уменьшением размера частиц [6, 10, 11].

*Ацилирование.* Данная реакция нуклеофильного замещения между ацилирующими агентами и аминокислотными остатками белков, приводит к улучшению общих функциональных свойств готового продукта. В ранее проведенных исследованиях данного метода данная химическая обработка использовалась для модификации изолята белка гороха и показала общее снижение гидрофобности поверхности и улучшение растворимости белка выше изоэлектрической точки [4, 9, 12].

*Ферментация.* Это нетермический метод обработки, используемый различные микроорганизмы:

бактерии, грибы, с целью частичного раскрытия белков и повышения общей биодоступности белкового продукта. На сегодняшний день ферментация молочнокислыми бактериями – наиболее популярный метод биологической очистки, используемый для улучшения вкуса и функциональных свойств горохового белка: маслоудерживающей и пенообразующая способность.

При этом ферментация различными штаммами бактерий и грибов показывает общее снижение растворимости горохового белка с увеличением времени ферментации из-за снижения *pH* растворителя, в результате данной модификации, что способствует снижению растворимости белка [6, 10, 11].

*Ферментативный гидролиз.* Это метод модификации, при котором протеолитические ферменты используются для гидролиза белков путем расщепления пептидных связей, что способствует образованию более мелких пептидов и аминокислот с более низкой молекулярной массой. Гидролиз приводит к раскрытию гидрофобных и гидрофильных групп и увеличению общего количества ионизируемых групп. Так, например, белок гороха, гидролизованный трипсином, савиназой, папаином и пепсином, привел к увеличению общей поверхностной гидрофобности в сравнении с необработанным изолятом горохового протеина, независимо от используемого фермента. Таким образом, гидролиз приводит к тому, что структура белка становится более распутанной, тем самым способствуя раскрытию скрытых гидрофобных групп и увеличению гидрофобности поверхности [6, 10, 11].

На сегодняшний день, несмотря на рост спроса и интереса к изоляту белка гороха, большая часть населения скептически относятся к органолептическим показателям данного продукта, как и ко многим другим растительным изолятам белков: ощущение неестественности аналогов животных продуктов, изменение общей текстуры продуктов, изменение привычного цвета продуктов, изменение вкусовых показателей продуктов и появление растительного привкуса. Таким образом, можно утверждать, что одним из наиболее потенциальных направлений является анализ влияния различных методов обработки на улучшение органолептических показателей горохового белка и снижение бобового вкуса. Решение данного вопроса потенциально может повысить привлекательность гороховых белков в качестве заменителей животных белков и позволит расширить возможности применения гороховых белков в пищевой промышленности. При этом можно отметить, что еще одним из многообещающих направлений для будущих исследований является изучение методов ацилирования. Изучение влияния ацилирования на функциональные свойства белков гороха, может привести к прогрессу в улучшении их растворимости, эмульгирующих свойств и других функциональных особенностей.

**Выводы.** Результаты проведенных исследований, на основе разработанных технологических параметрах получения изолята горохового белка, по завершению осаждения белков в их изоэлектрической точке при *pH* 4,2±0,05, при использовании 1% лактата кальция показали, что происходит выпадение осадка на 38,2% больше, в сравнении с результатами контрольного образца, что дает общий выход в 64,95% от содержания в исходном сырье, что дает возможность возможность называть полученные изоляты – концентратами.

По результатам сравнения различных изолятов горохового белка было определено, что содержание белка в анализируемом продукте полученным лабораторным методом, превышало содержание в коммерческих изолятах. Создание горохового концентрата в лабораторных условиях при комбинации физических методов – ультразвуком и модификация биологическим методом с помощью ферментов, способно создать конкуренцию современным методам производства коммерческих изолятов.

Однако на сегодняшний день, при сравнении всех различных методов изменения функциональности белков гороха, можно отметить, что одним из наиболее эффективных методов является химическая обработка, за которой следует биологическая обработка и физическая обработка. Таким образом, химическая модификация горохового белка повышает растворимость, эмульгирующие и пенообразующие способности исследуемого образца, что подчеркивает потенциал использования химически модифицированного горохового белка в качестве пенообразователей и эмульгаторов в пищевых продуктах. При этом дальнейшие исследования данного метода должны быть направлены на определении, экономической эффективности данного метода и способствует ли образованию отходов, требующих дополнительную обработку. С другой стороны, было показано, что биологическая очистка приводит к значительному улучшению масло- и водоудерживающей способности белков гороха, позволяющим его использовать для улучшения текстуры пищевых продуктов. Стоит отметить, что несмотря на выявленные фавориты среди всех методов, каждый из них имеет свои уникальные преимущества и потенциальные недостатки, создающих конкуренцию друг-другу и потому выборе следует руководствоваться конкретными требованиями и целями использования рассматриваемого пищевого продукта. Так, например, физическая обработка методом ультразвука и тепла, могут улучшить растворимость и эмульгирующие свойства, но могут привести к денатурирации белка, если не производить контроль процесса должным образом. Химическая обработка методом гликирования и ацилирования, улучшают функциональные свойства анализируемого образца, улучшая водоудерживающую способность и прочность геля, но часто требуют дополнительных реагентов. В биологических методах используются ферменты для точной модификации структуры белка, что значительно улучшает функциональность, однако, общая стоимость используемых ферментов и сложность их использования ввиду необходимых

знаний могут ограничивать их масштабное применение. Таким образом выбор каждого из методов должен соответствовать характеристикам пищевого продукта, условиям переработки, знаниям сотрудников и продажной цены готового продукта.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Багмут, Ю.Н. Повышение пищевой ценности кулинарной продукции с использованием растительного сырья / Ю.Н. Багмут, А.В. Арисов, О.В. Чугунова // Потребительский рынок: качество и безопасность товаров и услуг. – 2022. – №2. – С. 22-25.

2. Бобков С.В., Уварова О.В. Разработка оптимального метода получения изолированных белков гороха для использования в селекции на качество // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2020. – N. 4. – С. 24-28.

3. Бычкова, Е.А. белковые концентраты сои: технологии производства и перспективы применения / Е.А. Бычкова, А.В. Борисова // Ползуновский вестник. – 2021. – № 2. – С. 88-94. – DOI 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.02.012. – EDN: FVPTVI.

4. Munteanu C., Schwartz B. The relationship between nutrition and the immune system / C. Munteanu, B. Schwartz // Frontiers in Nutrition. – 2022. – №9. – P. 234-248. – DOI: 10.3389/fnut.2022.1082500

5. Науменко Н.В., Фаткулин Р.И., Калинина И.В. Возможности получения сырьевых ингредиентов растительного происхождения повышенной биодоступности // Индустрия питания. – 2023. – Т. 8. – No 4. – С. 58-67. – DOI 10.29141/2500-1922-2023-8-4-6.

6. Мещерякова О.В. Анализ аминокислотного состава и структуры изолятов белка амаранта при различных условиях его выделения / О.В. Мещерякова, Л.И. Василенко, А.С. Губин, Т.В. Свиридова, О.С. Корнеева// Сорбционные и хроматографические процессы. – 2022. – № 6. – С. 841-848.

7. Agboola, S.O. Functional properties of yellow field pea (Pisum sativum L.) seed flours and the in vitro bioactive properties of their polyphenols / S.O. Agboola, O.A. Mofolasayo, B.M. Watts, R.E. Aluko // Food Research International. – 2010. – V. 43 (2). – P. 582-588. DOI: 10.1016/j.foodres.2009.07.013.

8. Показатели качества гороховых и нутовых белковых концентратов / В.В. Колпакова [и др.] // Техника и технология пищевых производств. – 2022. – Т. 52. – № 4. – С. 649-664. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-4-2394.

9. Chong, K.Y. Development of Pea Protein Films with Haskap (Lonicera caerulea) Leaf Extracts from Aqueous Two-phase Systems / K.Y. Chong, Y. Yuryev, A. Jain // Food Bioprocess Technology. – 2021. – V. 14. – P. 1733-1750. https://doi.org/10.1007/s11947-021-02671-6.

10. Chang L., Lan Y., Bandillo N., Ohm J., Chen B., Rao J. Plant proteins from green pea and chickpea: Extraction, fractionation, structural characterization, and functional properties // Food Hydrocolloids. – 2022. – №123. – P. 107-115. – DOI: /10.1016/j.foodhyd.2021.107165.

11. Биологическая переработка зерна гороха и вторичного сырья крахмального производства с получением пищевых и кормовых белковых концентратов / Д.С. Куликов, В.В. Колпакова, Р.В. Уланова [и др.] // Биотехнология. – 2020. – Т. 36. – № 4. – С. 49-58. – DOI: 10.21519/0234-2758-2020-36-4-49-58.

12. Гайворонская, И.С. Белковые композиции из зерновых культур с повышенной биологической ценностью, синтезированные с ферментом трансглютаминазой / И.С. Гайворонская, В.В. Колпакова // Пищевая промышленность. – 2019. – N. 4. – С. 28-30.

13. Yi J., Zeng X., Zhang Y. Fabrication of pea protein nanoparticles with calcium-induced cross-linking for the stabilization and delivery of antioxidative resveratrol / J. Yi, X. Zeng, Y. Zhang// International Journal of Biological Macromolecules. – 2020. – №152. – P. 1154-1168. – DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2020.02.248.

14. Santos M.D., Rosha D., Bernardinelli O.D, Understanding the Performance of Plant Protein Concentrates as Partial Meat Substitutes in Hybrid Meat Emulsions. / M.D. Santos, D. Rosha, O.D. Bernardinelli // Foods. – 2022 – №11. – P. 31-38. DOI: 10.3390/foods11213311.

15. Tanger C., Engel J. , Kulozik U. Influence of extraction conditions on the conformational alteration of pea protein extracted from pea flour. / C. Tanger, J. Engel, U. Kulozik // Food Hydrocoll. – 2020 – №107. – P. 115-123.

16. Chao D., Jung S., Aluko R.E. Physicochemical and Functional Properties of High Pressure-Treated Isolated Pea Protein. // Innov. Food Sci. Emerg. Technol. – 2018. – №45. – P. 179-185. DOI: /10.1016/j.ifset.2017.10.014.

17. Kumar M., Tomar M., Punia S., Dhakane-Lad J., Plant-based proteins and their multifaceted industrial applications / M. Kumar, M. Tomar, S. Punia, J. Dhakane-Lad // LWT. – 2022. – №154. – P.112-120.

18. Чугунова О.В., Бикбулатов П.С., Соколов А.Л., Н.В. Заворохина Исследование влияния высокого гидростатического давления на функциональные свойства изолята горохового белка / О.В. Чугунова, П.С. Бикбулатов, А.Л. Соколов, Н.В. Заворохина // Новые технологии. – 2023. – № 4. – С. 183-189. – DOI: 10.47370/2072-0920-2023-19-4-183-189. – EDN: SDINJO.

19. Yan, F. Small Peptides Hydrolyzed from Pea Protein and Their Maillard Reaction Products as Taste Modifiers: Saltiness, Umami, and Kokumi Enhancement / F. Yan, H. Cui, Q. Zhang // Food and Bioprocess Technology. – 2021. – V. 14. – P. 1132-1141. https://doi.org/10.1007/s11947-021-02630-1.

20. Garcia-Segovia, P. Use of insects and pea powder as alternative protein and mineral sources in extruded snacks / P. Garcia-Segovia, M. Igual, A.T. Noguerol, J. Martinez-Monzo // European Food Research and Technology. – 2020. – V. 4. – P. 703-712. https://doi. org/10.1007/s00217-020-03441-y.

21. Schmidt, F., Blankart, M., Wanger, J. Upscaling of alkaline pea protein extraction from dry milled and pre-treated peas from laboratory to pilot scale: Optimization of process parameters for higher protein yields. / F. Schmidt., M. Blankart, J. Wanger// Food Measure. – 2022. – №16. – P. 4904-4913. https://doi.org/10.1007/s11694-022-01558.

22. Moll, P. Impact of microfluidization on colloidal properties of insoluble pea protein fractions / P. Moll, H. Salminen, C. Schmitt // European Food Research and Technology. – 2021. – V. 247. – P. 545-554. https://doi.org/10.1007/s00217-020- 03629-2.

23. Патент № 2157074, Российская Федерация, МПК A23L1/20, A23L1/40, A23P1/12. Способ производства горохового концентрата быстрого приготовления / О.Ю. Красильников, Е.В. Кульбацкий; заявитель и патентообладатель Красильников О.Ю., Кульбацкий Е.В. № 98113672/13; заявл. 09.07.1998, опубл. 10.10.2000, Бюл. № 28.

*Статья поступила в редакцию 07.04.2024*
*Статья принята к публикации 17.06.2024*

УДК 641.1/.3664
EDN: YJJHOW

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОРОШКА ОБЛЕПИХИ В ПРЯНИЧНЫХ ИЗДЕЛИЯХ

©Автор(ы) 2024

SPIN: 5065-7199
AuthorID: 544184
ORCID: 0000-0002-8896-647X
**СМОЛЬЯНОВА Аля Павловна,** кандидат сельскохозяйственных наук,
доцент кафедры Пищевых производств
*Пензенский государственный технологический университет*
*(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11, e-mail: pokupri068@gmail.com)*
SPIN: 4655-9826
AuthorID: 1056940
ORCID: 0000-0002-6370-0931
**ВОЛОШИНА Марина Олеговна,** старший преподаватель кафедры Пищевых производств
*Пензенский государственный технологический университет*
*(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11, e-mail: mari6ka_o_g@list.ru)*
**ЛОМАКИНА Полина Анатольевна,** студентка кафедры Пищевых производств
*Пензенский государственный технологический университет*
*(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11, e-mail: lpa220202@gmail.com)*

**Аннотация.** Разработка высокоэффективных технологий, внедрение оригинальных рецептур, создание продукции нового поколения, должны содержать необходимые для человека физиологически ценные вещества и оказывать положительное влияние на организм человека. Несбалансированное питание, недостаток витаминов, минералов, создает существенную угрозу для здоровья человека. Главной задачей на сегодняшний день, является решение проблемы неполноценного питания. Продукты питания способны корректировать процессы метаболизма в организме человека и тем самым снижать риски развития различных заболеваний. Использования новых видов сырья для целенаправленной коррекции состава, поможет получить новые виды высококачественных и конкурентоспособных готовых изделий. Одним из наиболее распространенных продуктов кондитерской отрасли являются – пряничное изделие. Порошок облепихи – нетрадиционное сырье, используемое в рецептурах пряничных изделий, богато пищевыми волокнами, имеет незаменимый аминокислотный состав, является полноценным источником витаминов группы *B* ($B_1$, $B_2$, $B_5$, $B_6$ и $B_9$) *C* и *E*, минеральными веществами, такими как йод, натрий, магний, фосфор, кальций и калий. В статье рассмотрено применение порошка плодов облепихи в рецептурах пряничных изделий. Плоды в сушеном виде сохраняют полезные свойства на протяжении 18 месяцев. В мякоти ягод достаточно много витаминов, микроэлементов и пищевых волокон. Полученные пряничные изделия проанализированы по органолептическим и физико-химическим показателям, проведена дегустационная оценка, определен наилучший по показателям образец с добавлением в рецептуру 10%-порошка плодов облепихи. Рассчитана пищевая и энергетическая ценность готовых изделий.

**Ключевые слова:** пряничное изделия, порошок облепихи, рецептура.

# USING OBLIBIHA POWDER IN GINGERBOOK PRODUCTS

© The Author (s)2024

**SMOLYANOVA Alya Pavlovna**, candidate of agricultural sciences,
associate professor of the Department of Food Production
**VOLOSHINA Marina Olegovna**, senior lecturer of the Department of Food Production
**LOMAKINA Polina Anatolyevna**, student of the Department of Food Production
*Penza State Technological University*
*(440039, Russia, Penza, Baidukova Passage/ul. Gagarina, 1a/11,*
*e-mails: pokupki068@gmail.com, mari6ka_o_g@list.ru, lpa220202@gmail.com)*

**Abstract.** The development of highly effective technologies, the introduction of original recipes, the creation of new generation products must contain physiologically valuable substances necessary for humans and have a positive effect on the human body. An unbalanced diet and lack of vitamins and minerals pose a significant threat to human health. The main task today is to solve the problem of malnutrition. Food products can correct metabolic processes in the human body and thereby reduce the risks of developing various diseases. The use of new types of raw materials for targeted correction of the composition will help obtain new types of high-quality and competitive finished products. One of the most common products in the confectionery industry is gingerbread. Sea buckthorn powder is an unconventional raw material used in gingerbread recipes, rich in dietary fiber, has an essential amino acid composition, and is a complete source of *B* vitamins ($B_1$, $B_2$, $B_5$, $B_6$ and $B_9$) *C* and *E*, minerals such as iodine, sodium , magnesium, phosphorus, calcium and potassium. The article discusses the use of sea buckthorn fruit powder in the recipes of gingerbread products. Dried fruits retain their beneficial properties for 18 months. The pulp of the berries contains quite a lot of vitamins and micro-

elements, group vitamins
**Keywords:** gingerbread products, sea buckthorn powder, recipe.

***Для цитирования:*** *Смольянова А.П. Использование порошка облепихи в пряничных изделиях / А.П. Смольянова, М.О. Волошина, П.А. Ломакина// XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 2(66). – С. 114-119. – EDN: YJJHOW.*

**Введение.** Важная задача на сегодняшний день в кластере пищевой промышленности – это разработка продуктов полноценного питания, направленная на сохранение и укрепление здоровья населения и профилактике неинфекционных заболеваний.

Быстрая урбанизация и меняющийся образ жизни привели к опасным для здоровья человека изменениям в моделях пищевого поведения.

Потребление людьми избыточного количества продуктов с высоким содержанием калорий, жиров, сахаров, соли в тоже время минимальным количеством растительной пищи, клетчатки и цельных злаков, пагубно влияют на здоровье человека [1].

Применяемые нетрадиционные виды сырья в производстве мучных кондитерских изделий позволяют сделать продукты не только вкусными, но и полезными. Обогащение готовых изделий незаменимыми аминокислотами, полиненасыщенными жирными кислотами, минеральными веществами, способствует улучшению качества [2-8]. Использование порошка облепихи в рецептурах мучных кондитерских изделий поможет решить задачу функциональной направленности. Высушенные плоды облепихи и последующее их измельчение позволит получить сырье с повышенным содержанием биологически активных веществ. Потребительские свойства и характеристики порошка облепихи будут способствовать расширению ассортимента мучных кондитерских и хлебобулочных изделий [9-15].

Облепиха крушиновидная (лат. *Hippóphaë*) – небольшой кустарник или дерево, с мелкими сизыми листьями. Во время плодоношения все ветки усыпаны оранжевыми плодами. Они имею круглую или овальную форму гладкую поверхность, цвет от золотисто-желтоватого до красно – оранжевого. Созревание плодов происходит в конце лета.

Облепиха широко распространяется на Алтае и в Сибири. Встречается облепиха и в тропиках Индии, Пакистане.

Плоды облепихи содержат 190 биологически активных веществ. Такие витамины как *A, $B_1$, $B_2$, C, D, E*, флавоноиды, аминокислоты, фенолы, бета-каротин, фолиевая и органические кислоты. Также она включает в себя 20 минеральных элементов [16-17].

Для получения порошка используют плоды облепихи, сбор ягод осуществляется только после полного созревания.

Созревшие плоды тщательно перебираются перед сушкой. Для сохранения полезных свойств ягод, сушка производиться при щадящих температурных режимах, конвективным способом. Сушка плодов происходит в течение 4-6 часов до содержания влажности в продукте 12-13%. Ухудшению органолептических показателей способствуют температуры свыше 80°С. Высушенные плоды подвергаются измельчению. Хранение порошка облепихи осуществляется в герметично закрытой таре, на протяжении длительного времени.

**Методология.** Целью исследования – явилась возможность использования порошка плодов облепихи в рецептурах пряничных изделий.

Объекты исследования: пряничный полуфабрикат и порошок из плодов облепихи.

Была разработана рецептура пряников с порошком облепихи. Сублимированный порошок из ягод облепихи упрощает расчет рецептуры по сухим веществам, не требует предварительной его подготовки. При замесе теста отмечалось равномерное распределение вносимого порошка по всей массе.

Рецептура представлена в таблице 1.

*Таблица 1 – Рецептуры пряничных изделий*

| Наименование сырья | Массовая доля сухих веществ (с/в), % | Расход сырья на 1 кг изделий, г | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Образец 1 (контроль) [18]. | | Экспериментальные образцы | | | | | |
| | | | | Образец 2 | | Образец 3 | | Образец 4 | |
| | | | | Количество облепихового порошка, % | | | | | |
| | | | | 5 | | 10 | | 15 | |
| | | в натуре | в с/в | в натуре | в с/в | в натуре | в с/в | в натуре | в с/в |
| Мука пшеничная | 85,5 | 566,61 | 484,4 | 393,6 | 460,3 | 372,9 | 436,1 | 352,1 | 411,8 |
| Мука пшеничная на подпыл | 85,5 | 44,2 | 37,8 | 44,2 | 37,79 | 44,2 | 37,79 | 44,2 | 37,79 |
| Облепиха (порошок) | 90,0 | - | - | 21,8 | 24,2 | 43,6 | 48,4 | 65,4 | 72,7 |
| Масло растительное | 100,0 | 351,3 | 350,8 | 351,3 | 350,8 | 351,3 | 350,8 | 351,3 | 350,8 |
| Сахар | 99,9 | 14,17 | 14,2 | 14,17 | 14,17 | 14,17 | 14,17 | 14,17 | 14,17 |
| Эссенция ванильная | - | 2,26 | - | 2,26 | - | 2,26 | - | 2,26 | - |
| Углеаммонная соль | - | 6,63 | - | 6,63 | - | 6,63 | - | 6,63 | - |

Порошок плодов облепихи в рецептуре пряничного изделия вводили в качестве замены части муки, расчеты проводились по сухому веществу. Проведена дегустационная оценка готовых изделий, определены органолептические и физико-химические показатели. Представлен сравнительный анализ контрольного и опытных образцов, рассчитана пищевая и энергетическая ценность готовых изделий.

**Результаты.** По внешнему виду измельченный порошок представляет собой рассыпчатую массу ярко-оранжевого цвета, с частичными вкраплениями темно-коричневых раздробленных семян, имеет аромат облепихи, вкус кисловатый, свойственный облепихе (рис. 1).

Облепиховым порошоком производилась замена части используемой в рецептуре муки. Для приготовления пряничных изделий применяли муку высшего сорта.

Пряничные изделия, приготовленные с разным процентным соотношением порошка облепихи отличаются – оранжевым оттенком, наличием небольшого количества темных вкраплений в тестовой структуре пряников и ароматом облепихи с кислинкой.

Проведена органолептическая оценка пряничных полуфабрикатов (ГОСТ 15810-2014 Изделия кондитерские. Изделия пряничные. Общие технические условия), результаты которой представлены на рисунке 2.

Органолептическая оценка выпеченных полуфабрикотов прводилась по 5-ти бальной шкале.

Исходя из проведенных исследований органолептических показателей представленных образцов пряников, следует, что внесение 5% порошка облепихи не привело к значительным изменениям от контрольного образца. При внесении облепихового порошка в количестве 10% наблюдается изменение цвета выпеченных полуфабрикатов, приобретается золотисто-оранжевый цвет и в мякише увеличивается количество темных вкраплений порошка облепихи, появляется приятный аромат и вкус облепихи. В опытным образце 4 отмечалось незначительное ухудшение показателей качества (появление трещинок на поверхности изделия и выраженного кисловатого вкуса).



*Рисунок 1 – Порошок облепихи марки «Леопольд»*

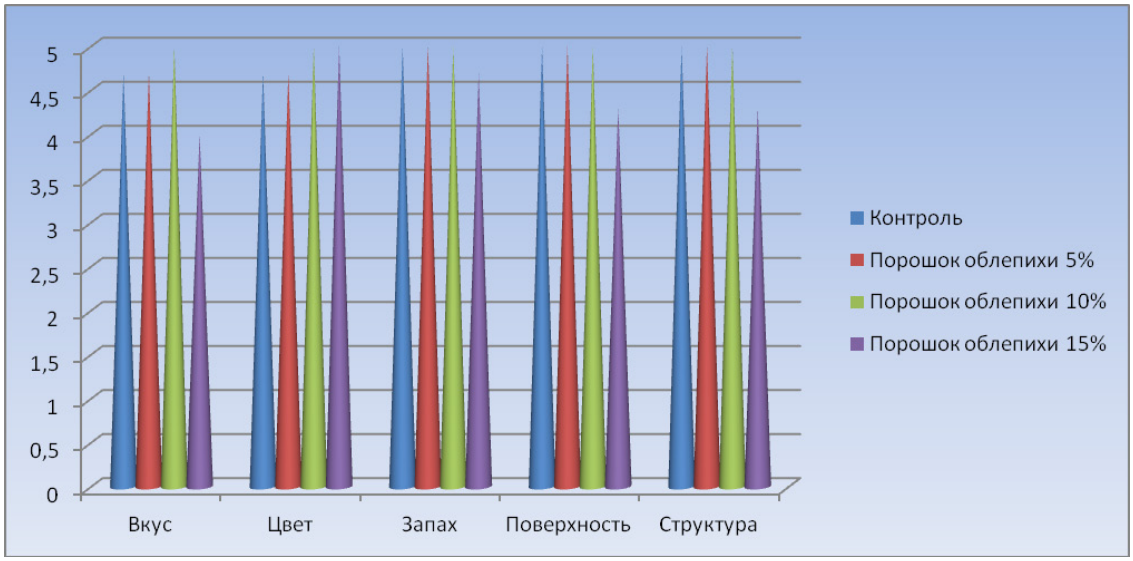



*Рисунок 2 – Органолептическая оценка образцов пряничных полуфабрикатов*

Соответственно, благодаря результатам органолептической оценки можно выделить образец 3 (10% порошка облепихи), обладающий наилучшими органолептическими показателями.

Готовые пряничные изделия представлены на рисунке 3.

Пищевая ценность пряников с порошком облепихи, в сравнении с контрольным образцом представлена на рисунке 4.

Данные диаграммы показывают, что снижение содержания основных питательных веществ и энергетической ценности находиться в прямой зависимости от химического состава облепихового порошка, что делает пряники менее калорийным изделием, за счет того, что с добавлением порошка облепихи снижается количество углеводов. Несмотря на то, что содержание жира увеличивается, жирнокислотный состав выделенный из семян облепихи отличается содержанием полезных в виде насыщенной пальминовой и ненасыщенной олеиновой кислот.

Энергетическая ценность готовых изделий составляет: образец 1 (контроль) – 205,4 ккал, образец 2 (облепиха 5%) – 180,9 ккал, образец 3 облепиха10% – 190,5 ккал, образец 4 облепиха 15% – 199,5 ккал,

Содержание витаминов и макроэлементов в пряничных изделиях с порошком облепихи, в сравнении с контролем, представлено на рисунке 5 [19].

Опираясь на данные, представленные в гистограмме сделан вывод об увеличении содержания в изделиях с облепиховым порошком витаминов группы *B. C* добавлением порошка облепихи в изделиях увеличилось содержание калия, фосфора, магния и кальция.




*Рисунок 3 – Внешний вид образцов пряничных изделий:*
*а) контроль, б) 5% порошка облепихи, в) 10% порошка облепихи, г) 15% порошка облепихи*

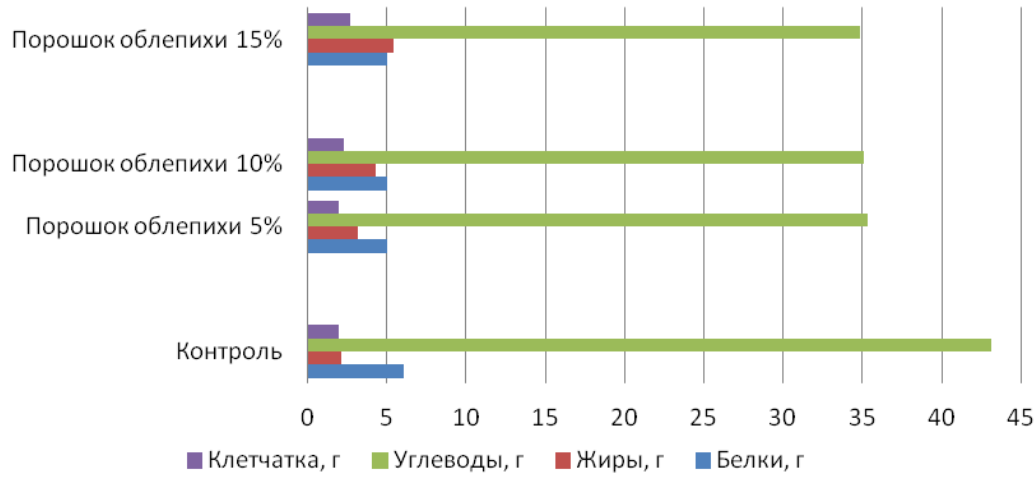



*Рисунок 4 – Пищевая ценность пряничных изделий*

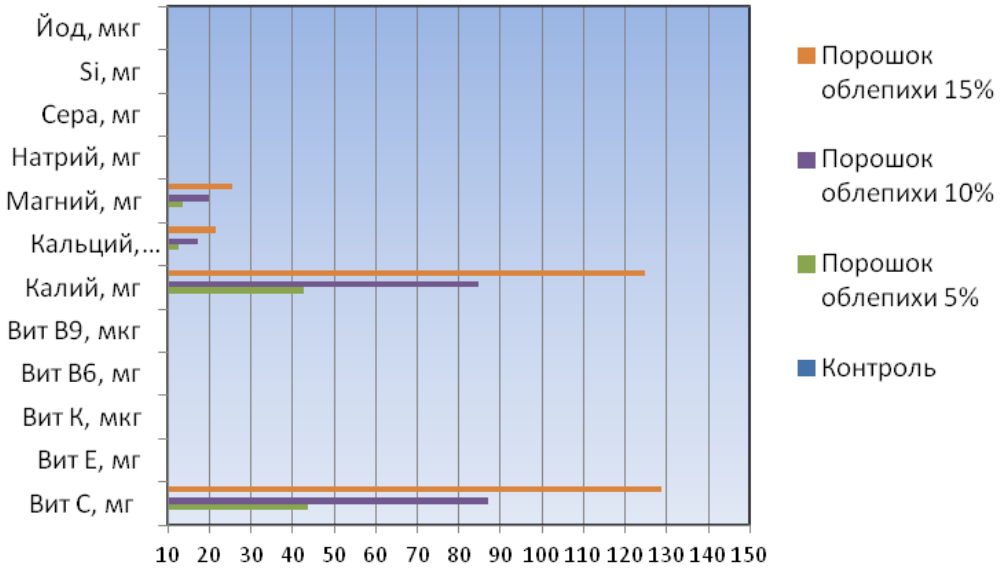



*Рисунок 5 – Расчетное содержание витаминов и минеральных веществ в пряничных изделиях*

**Обсуждение.** Анализ экспериментальных данных других авторов (Туманова А.Е., Присухина Н.В., Типсина Н.Н., Машанов А.И., Селиванов Н.И.), подтверждает, что натуральное растительное сырье содержит биологически активные вещества, повышающее пищевую ценность готовой продукции. Испытуемые образцы соответствуют нормативной документации и могут быть рекомендованы в качестве сбалансированных мучных кондитерских изделий для различных категорий потребителей. Функциональные растительные пищевые ингредиенты в готовых изделиях позволяют получить безопасные продукты с оригинальным вкусом.

**Выводы.** Проведенные исследования являются достаточным доказательством эффективного влияния порошка из плодов облепихи на качество пряничных изделий. Наиболее целесообразным считается добавление 10% порошка облепихи в рецептуру в мучных кондитерских изделий. Данный образец имеет наилучшие органолептические показатели по сравнению с другими образцами. Также представленные данные подтверждают, что добавление облепихового порошка способствует снижению калорийности изделия и увеличению минерального состава продукта и пищевых волокон.

Внедрение в производство продуктов функциональной направленности будет способствовать расширению потребительской аудитории, также позволит решить проблемы рационального использования растительного сырья.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Матушкина, Ю.А. Формирование мотивации к здоровому образу жизни у обучающихся общеобразовательных учебных заведений. Наука и Образование. – 2020. – Т. 3. – № 2. – С. 236.

2. Джабоева А.С., Шаова Л.Г., Жилова Р.М., Ширитова Л.Ж. Использование порошка из плодов облепихи в производстве булочных изделий. Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2013. – № 2-3 (332-333). – С. 117-119.

3. Матвеева Ю.С., Типсина Н.Н. получение порошка из облепихи для использования в продуктах функционального назначения. В сборнике: Инновационные тенденции развития российской науки. Материалы VI Международной научно-практической конференции молодых ученых. – 2013. – С. 178-180.

4. Назарова А.А., Канкулова Д.М. Использование порошка облепихи в производстве кондитерских изделий. В сборнике: Актуальные проблемы технологии продуктов питания, туризма и торговли. Материалы V Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. Нальчик, 2023. – С. 58-61.

5. Махаева Л.А., Селезнѐва Г.К. Использование порошка облепихи в мучных кондитерских изделиях. Вестник КрасГАУ. – 2017. – № 6 (129). – С. 79-85.

6. Типсина Н.Н., Матюшев В.В., Присухина Н.В., Царёва Е.А. Использование порошка облепихи в производстве кондитерских изделий. Вестник КрасГАУ. – 2013. – № 5 (80). – С. 223-228.

7. Егорова Е.Ю. Использование сушёной облепихи и брусники в технологии кексов. Хлебопродукты. – 2018. – № 7. – С. 40-43.

8. Мацейчик И.В., Сапожников А.Н., Рождественская Л.Н. Исследование качества бисквитов с продуктами переработки овса и ягодными порошками. Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. – 2015. – № 3 (7). – С. 45-52.

9. Созаева Д.Р., Шокарова А.С. исследование целесообразности использования порошка из плодов облепихи в качестве обогащающей добавки. В сборнике: Актуальные проблемы технологии продуктов питания, туризма и торговли. Материалы VI Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. Нальчик, 2023. – С. 38-41.

10. Туманова А.Е., Присухина Н.В., Типсина Н.Н., Машанов А.И., Селиванов Н.И. Использование смеси растительных порошков в производстве булочных изделий. Пищевая промышленность. – 2022. – № 1. – С. 16-20.

11. Шаова Л.Г., Джабоева А.С., Ширитова Л.Ж., Жанакуева А.А. Разработка булочных изделий с повышенным содержанием антиоксидантов. В сборнике: Пищевая индустрия и общественное питание: современное состояние и перспективы развития. Сборник статей I Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – 2017. – С. 50-55.

12. Брыксина К.В., Перфилова О.В. Перспективы

использования нетрадиционного растительного сырья при производстве функциональных продуктов питания. Наука и Образование. – 2020. – Т. 3. – № 4. – С. 126.

13. Оськина Ю.Н. Перспективы применения порошка из плодово-ягодного сырья в технологии производства палочек хлебных В сборнике: Вклад молодых ученых в аграрную науку. Материалы международной научно-практической конференции. Кинель, 2021. – С. 450-454.

14. Нилова Л.П. Изучение состава антиоксидантов хлебобулочных изделий, обогащенных ингредиентами растительного происхождения. Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов. – 2020. – № 6 (65). – С. 40-45.

15. Доценко В.Ф., Мирошник Ю.А., Шидловская Е.Б., Медвидь И.М. Исследование возможности использования плодовых порошков в технологии бисквитных полуфабрикатов. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – Т. 3. – № 10 (69). – С. 64-69.

16. Иванова З.А., Тхазеплова Ф.Х. Применение биодобавок из плодов облепихи в технологии производства макаронных изделий. Новые технологии. – 2018. – № 4. – С. 22-27.

17. Сокол Н.В., Санжаровская Н.С. Изучение влияния растительной добавки из плодов облепихи на реологию теста и качество хлеба. Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В.М. Кокова. – 2023. – № 1 (39). – С. 150-158.

18. Сборник рецептур мучных кондитерских и булочных изделий для предприятий общественного питания/ А.В. Павлов. – СПб: Гидрометеоиздат, 1998. – 286 с.

19. Химический состав российских пищевых продуктов: Справочник / Под ред. член-корр. МАИ, проф. И. М. Скурихина и академика РАМН, проф. В. А. Тутельяна. – ДеЛи принт, 2002. – 236 с.

*Статья поступила в редакцию 21.03.2024*
*Статья принята к публикации 17.06.2024*

УДК 372.881.1
EDN: RHEAZP

# РАСЧЕТ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕМБРАННОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ СКВАШЕННОГО МОЛОКА

© Автор(ы) 2024
SPIN: 1390-7470
AuthorID: 358300
ORCID: 0000-0001-6457-5565
ResearcherID: S-8884-2017
**КУВШИНОВА Ольга Александровна**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Механизация переработки сельскохозяйственной продукции» института механики и энергетики
*Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва*
*(430002, Россия, Саранск, улица Большевистская, 68, e-mail: olga-kuvshinova@rambler.ru)*
SPIN: 1896-8644
AuthorID: 619901
ORCID: 0000-0002-5367-264X
ResearcherID: ACG-1243-2022
**КУВШИНОВ Алексей Николаевич**, кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А.И. Лещанкина» института механики и энергетики
*Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва*
*(430002, Россия, Саранск, улица Большевистская, 68, e-mail: mesmgu@mail.ru)*

**Аннотация.** Ультрафильтрация может использоваться для концентрирования сквашенного молока при производстве творога с более нежной текстурой и большей производительностью, чем при традиционной технологии. Снижению себестоимости продукта способствует применение керамических мембранных элементов. Возможность их быстрой очистки и постоянной регенерации позволяет сократить расход на покупку новых мембран. Цель данной работы состоит в определении влияния вязкости сквашенного молока, его объемного расхода и температуры концентрирования на гидравлическое сопротивление в трубах разного диаметра. Получение творога отрабатывалось на лабораторной мембранной установке, оснащенной разделительным керамическим элементом селективностью 200 kD. Температура концентрирования сквашенного молока составляла 323 К, начальная массовая доля сухих веществ 10,08%, конечное содержание сухих веществ творога 18%. Исследования проведены при изменении трансмембранного давления в диапазоне 1,3…3,5 бар и скорости фильтрации с 1 до 5 м/с при постоянной температуре раствора. Приведена схема материальных потоков при ультрафильтрации сквашенного молока. Представлены основные формулы для расчета сопротивления осадка на поверхности мембраны. Теоретический расчет и практические результаты позволили оценить влияние на диффузионную проницаемость ультрафильтрационной керамической мембраны концентрации сквашенного молока, трансмембранного давления и скорости непрерывной фильтрации. Установлено, что с повышением концентрации диффузионная проницаемость снижается за счет формирования гелевого слоя, снижающего перенос молочных компонентов через пограничные и активные слои мембраны. Эксперимент показал, что белок был основной причиной блокировки мембраны. В статье приведены технологические параметры процесса ультрафильтрации сквашенного молока, сопоставленные с данными производства творога традиционным способом. Концентрирование сквашенного молока ультрафильтрацией позволяет сократить расход сырья более чем на 20%. Разработанный теоретический расчет массопереносных потоков веществ через керамические мембраны с большой точностью можно использовать в инженерных методиках прогнозирования эффективности применения баромембранных процессов для разделения, очистки и концентрирования промышленных и технологических растворов.

**Ключевые слова**: ультрафильтрация, концентрирование, молоко, творог, пограничный слой, мембранные технологии.

# CALCULATION OF THE HYDRODYNAMIC RESISTANCE OF A MEMBRANE PLANT FOR THE CONCENTRATION OF FERMENTED MILK

© The Author(s) 2024
**KUVSHINOVA Olga Aleksandrovna,** candidate in technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of Mechanization of Agricultural Products Processing institute of Mechanics and Power Engineering
*N.P. Ogarev Mordovian State University*
*(68 Bolshevistskaya Street, Saransk, 430002, Russia, e-mail: olga-kuvshinova@rambler.ru)*
**KUVSHINOV Aleksey Nikolaevich,** candidate in technical sciences, associate professor of the Department of Mobile Energy Means and Agricultural Machines named after prof. A.I. Leshchankin institute of Mechanics and Power Engineering

*N.P. Ogarev Mordovian State University*
*(68 Bolshevistskaya Street, Saransk, 430002, Russia, e-mail: mesmgu@mail.ru)*

**Abstract.** Ultrafiltration can be used to concentrate fermented milk to produce cottage cheese with a more delicate texture and higher productivity than with traditional technology. The use of ceramic membrane elements helps to reduce the cost of the product. The possibility of their rapid cleaning and constant regeneration allows you to reduce the cost of buying new membranes. The purpose of this work is to determine the effect of the viscosity of fermented milk, its volume flow rate and concentration temperature on the hydraulic resistance in pipes of different diameters. The production of cottage cheese was worked out on a laboratory membrane installation equipped with a separation ceramic element with a selectivity of 200 kD. The concentration temperature of fermented milk was 323 K, the initial mass fraction of dry matter was 10.08%, the final dry matter content of cottage cheese was 18%. The studies were carried out with a change in the transmembrane pressure in the range of 1.3...3.5 bar and the filtration rate from 1 to 5 m/s at a constant solution temperature. The scheme of material flows during ultrafiltration of fermented milk is given. The basic formulas for calculating the sediment resistance on the membrane surface are presented. The theoretical calculation and practical results allowed us to evaluate the effect of the concentration of fermented milk, transmembrane pressure and continuous filtration rate on the diffusion permeability of an ultrafiltration ceramic membrane. It was found that with increasing concentration, the diffusion permeability decreases due to the formation of a gel layer, which reduces the transfer of milk components through the boundary and active layers of the membrane. The experiment showed that protein was the main cause of membrane blockage.

**Keywords**: ultrafiltration, concentration, milk, cottage cheese, boundary layer, membrane technologies.

***Для цитирования:*** *Кувшинова О.А. Расчет гидродинамического сопротивления мембранной установки для концентрирования сквашенного молока / О.А. Кувшинова, А.Н. Кувшинов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 2(66). – С. 120-125. – EDN: RHEAZP.*

**Введение.** К распространенным кисломолочным продуктам относится творог. Его питательную ценность обуславливает повышенное содержание белка (14-18%), а также необходимых минеральных элементов и аминокислот [1]. В процесс производства творога происходит умеренное накопление молочной кислоты в молоке для последующего образования сгустка. В ходе обработки из сгустка удаляется лишняя влага и получается концентрированный белковый продукт [2-3].

В настоящее время на каждом молокозаводе на различных производственных стадиях (от приемки молока до очистки сточных вод) применяется мембранное оборудование. Метод ультрафильтрации используется для нормализации по белку и концентрирования молока, что позволяет увеличить общий выход творога, обеспечить постоянный состав продукта, равномерную кремовую консистенцию и повысить его пищевую ценность [4-6].

Одним из преимуществ является компактность ультрафильтрационной установки, снижение энергетических затрат, производственных площадей, увеличение санитарно-гигиенического уровня производства [7].

Анализ литературных источников показывает, что в целом промышленность производит широкий ассортимент мембранных элементов, пригодных для решения задач концентрирования молока [8-10].

Практикой установлено, что серьезной проблемой при производстве творога методом ультрафильтрации является значительный расход полимерных мембран спирального типа [11]. Применение керамических мембранных элементов позволяет решить проблему чувствительности мембран к химическим и термическим воздействиям, механическим включениям, абразивному износу, а также увеличить срок службы более 5 раз [12-16].

При разработке мембранных установок возникает множество проблем. Эффективность фильтрации зависит от физико-механических свойств обрабатываемой среды, скорости возникновения и роста осадка на поверхности мембраны [17-19].

**Методология.** Для расчета многосекционных установок необходимо выявить зависимость толщины и скорости появления осадка на поверхности мембран от физико-механических свойств пропускаемой среды.

Целью работы является расчет гидродинамического сопротивления каналов керамического ультрафильтрационного мембранного модуля установки при непрерывном концентрировании сквашенного молока.

Отработка технологии получения ультрафильтрационного творога проводилась на пилотной установке с керамическими мембранами фирмы *TAMI DEUTSCHLAND*. Использован восьмиканальный элемент с эквивалентным диаметром канала $d_э$=6мм; длиной $l$=1178 мм, площадью фильтрации $S_0$=0,2 м$^2$ и селективностью 500 kD [20]. В процессе исследовано сквашенное молоко, приготовленное из молока сухого по ГОСТ ISO 1736-2014 [21].

Технология изготовления творога методом ультрафильтрации на экспериментальной пилотной установке следующая:

1. Заквашивание обезжиренного молока до РН 4,5…4,7 (10 ч.).

2. Перемешивание (2…5 мин.).

3. Подогрев до температуры 48…54°С в течение 2…2,5 мин. горячей водой (70…90°С) в рубашке подогревателя.

4. Выдерживание (1…1,5 мин.).
5. Охлаждение до 30…40°С.
6. Обезвоживание.
7. Охлаждение до температуры 8…12°С.

Постоянный расход калье поддерживался 700 л/час. Для периодического очищения мембраны применялась технология обратного гидроудара [22].

Математическое моделирование гидродинамического сопротивления мембранного элемента осуществляется в определенной последовательности:

1. Экспериментально устанавливаются реологические свойства исходного сырья.
2. Вычисляется объемная доля дисперсной фазы в растворе.
3. Для мембранного канала длиной *l* определяется гидродинамическое сопротивление.
4. Для осадка в канале рассчитывается удельное сопротивление.

Для создания больших скоростей потока в мембранных каналах (рис. 1), уменьшающих скорость образования осадка на мембране, в техсхему добавлен высокопроизводительный насос. Перед входом в аппарат к потоку $G_0$ исходного сырья добавляется циркулирующий поток ретентата. Сформировавшийся поток $G_0(n+1)$ подается в мембранный модуль и концентрируется. В трансмембранный канал поступает поток $G_p$ фильтрата. Для соблюдения постоянной концентрации $x_R$ в любом сечении следует поддерживать кратность циркуляции $n > 10$ [23].

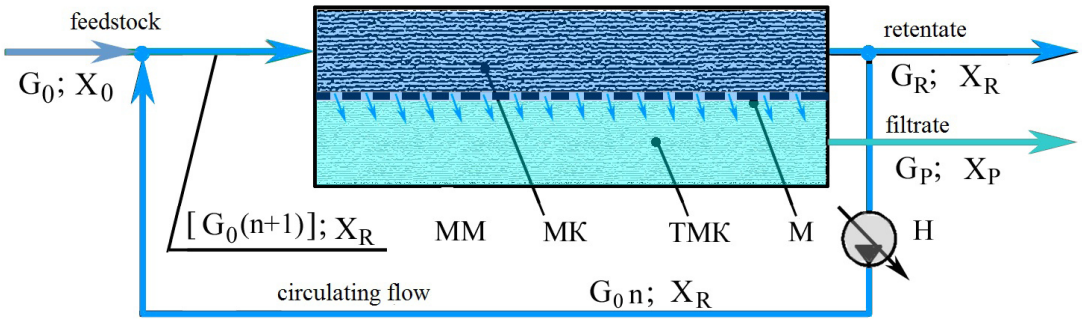



*Рисунок 1 – Схема материальных потоков при ультрафильтрации:*
*ММ – мембранный модуль; МК – мембранный канал; ТМК – трансмембранный канал;*
*М – мембрана; Н – циркуляционный насос; $G_0$, $G_p$, $G_R$ – поток входной, фильтрата и ретентата соответственно;*
*n – кратность циркуляции; $x_0$, $x_P$, $x_R$ – массовая доля растворенных веществ исходного сырья, фильтрата и ретентата*
*«Составлено авторами» [24]*

Уравнения материального баланса в соответствии со схемой материальных потоков в модуле (рис. 1) представятся при ультрафильтрации следующим образом [24]:

– баланс массовых потоков (1):

$$G_0 = G_R + G_P; \quad (1)$$

где $G_0$, $G_p$, $G_R$ – поток входной, фильтрата и ретентата соответственно;

– баланс сухих веществ (2):

$$G_0 \cdot x_0 = G_R \cdot x_R + G_P \cdot x_P; \quad (2)$$

где $x_0$, $x_P$, $x_R$ – массовая доля растворенных веществ исходного сырья, фильтрата и ретентата;

– массовый поток ретентата (концентрата) (3):

$$G_R = G_0 \frac{x_0 - x_P}{x_R - x_P}; \quad (3)$$

– массовый поток пермеата (фильтрата) (4):

$$G_P = G_0 \frac{x_R - x_0}{x_R - x_P}; \quad (4)$$

– содержание сухих веществ в ретентате (5):

$$x_R = \frac{G_0 \cdot x_0 - G_P \cdot x_P}{G_R} = \frac{G_0}{G_0 - G_P} x_0 \quad (5)$$

Для снижения образования осадка на поверхности керамических мембран следует придерживаться турбулентного режима [15]. Среднюю скорость потока задают в пределах 5 м/с.

Установлено, что массовая доля сухих веществ в сквашенном молоке составляет $x_0$ = 10,08%. Массовая доля дисперсной фазы, образовавшейся в результате коагуляции белков – $C_{f0}$ = 3,2%. Реологическое поведение концентрируемой среды описывается уравнением Оствальда-де-Виля (6):

$$\eta_{\dot{\gamma}} = k_0 \, k_T k_x \bar{\gamma}^n \quad (6)$$

где $\bar{\gamma} = d\gamma / dt$ – скорость сдвига, $с^{-1}$; $k_0$=12 Па·$с^n$ – коэффициент консистенции при температуре приведения $T_0$=25°С; $n$=0,28 – индекс течения, $k_T = exp[E(x)(T^{-1} - T_0^{-1})/R]$ – коэффициент, отражающий влияние температуры на значение вязкости; $E$ = 15410 Дж/(моль·К) – энергия активации вязкого течения; $k_x = (x / x_0)^m$ – коэффициент, отражающий влияние содержания сухих веществ на значение вязкости; $x_0$=17,9% – концентрация приведения; $m$ = 2,7.

Примем концентрацию белков и жиров $C_f$ в циркуляционном контуре равным 11,43%, содержание растворенных веществ – $x$=6,57%. Тогда общее содержание сухих веществ составит 18% при плотности творога – ретентата $\rho_R$ = 1055 кг/$м^3$.

Поправочные коэффициенты вводятся для температуры процесса $T = 323$ К [19]:

$$k_x = (x/x_0)^m = (17{,}9/17{,}9)^{2{,}7} = 1$$

$$k_T = \exp[E(x)(T^{-1} - T_0^{-1})/R] = \exp[15410 \cdot (323^{-1} - 298^{-1})/8{,}314] = 0{,}618 .$$

Для одного канала определим значение циркулирующего потока ретентата (7):

$$(Q_{R0})_{цк} = \pi\, d_э^2\, \overline{w}_z / 4 = 3{,}14 \cdot (6 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 5 / 4 = 1{,}41 \cdot 10^{-4}\, м^3/с , \quad (7)$$

где $d_э$ – диаметр канала, м; $\overline{w}_z$ – средняя скорость потока, м/с.

Вычислим приведенное число Рейнольдса для течения ретентата в мембранном канале (8) [24]:

$$\mathrm{Re}_{пр} = \frac{2^{3-n} \cdot \overline{w}_z^{\,2-n} d_э^n \rho_R}{k_x k_T k_0 (3+1/n)^n} = \frac{2^{3-0{,}28} \cdot 5^{2-0{,}28} (6 \cdot 10^{-3})^{0{,}28} \cdot 1055}{1 \cdot 0{,}618 \cdot 12 (3+1/0{,}28)^{0{,}28}} \cong 2110 , \quad (8)$$

т.е. режим течения ретентата в мембранном канале ламинарный.

Среднее значение эффективной вязкости ретентата составит (9) [19]:

$$\overline{\eta}_э = \overline{w}_z d_э \rho_R / \mathrm{Re}_{пр} = 5 \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot 1055 / 2110 = 0{,}015 . \quad (9)$$

Вычислим коэффициент гидравлического сопротивления мембранного канала для данного значения, исходя из формулы (10) [11]:

$$\lambda = 64\, \mathrm{Re}_{пр}^{-1} = 64 \cdot 2110^{-1} \cong 0{,}0303 . \quad (10)$$

Вычислим гидродинамическое сопротивление мембранного канала (потерю давления в канале) (11) [9]

$$\Delta p_R = (p_{вх} - p_{вых}) = 0{,}5 \overline{w}_z^{\,2} \rho_R (\lambda L / d_э) = 0{,}5 \cdot 5^2 \times$$

$$\times 1\,055 \cdot (0{,}0303 \cdot 1{,}187 / 0{,}006) \cong 79000\, Па. \quad (11)$$

где $p_{вх}$ и $p_{вых}$ – давление на входе и на выходе мембранного канала, Па, $L$ – длина мембранного канала, м.

Вычислим градиент давлений в мембранном канале (12) [15]:

$$\psi = \frac{dp_R}{dz} = -\frac{4 k_0 k_T k_x}{d_э} \left[ \frac{8(1+3n)}{\pi n} \frac{(Q_{Ro})_{цк}}{d_э^3} \right]^n = -\frac{\Delta p_R}{L} = -\frac{4 \cdot 12 \cdot 0{,}618 \cdot 1}{6 \cdot 10^{-3}} \times$$

$$\times \left[ \frac{8 \cdot (1+3 \cdot 0{,}28) \cdot 1{,}41 \cdot 10^{-4}}{3{,}14 \cdot 0{,}28 \cdot (6 \cdot 10^{-3})^3} \right]^{0{,}28} = -\frac{79000}{1{,}178} \cong -67100\ Па. \quad (12)$$

где $dp_R/dz$ – градиент давлений по длине мембранного канала.

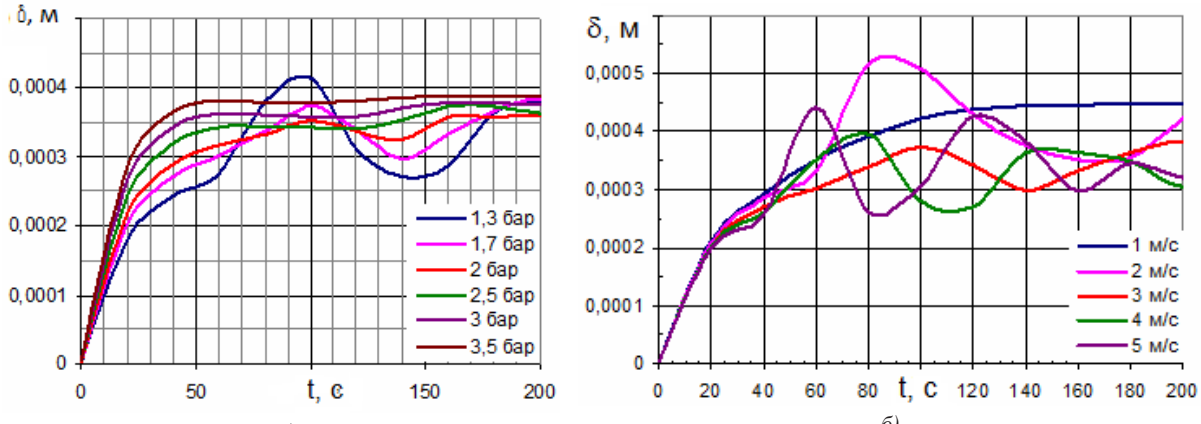
**Результаты.** На образование слоя белкового геля на поверхности мембраны сильное влияние оказывает физико-механические свойства концентрируемого сырья (вязкость, энергия активации вязкого течения) и самой мембраны [25, 10].

На рисунках 2 и 3 представлены результаты анализа проточной ультрафильтрации сквашенного молока в модуле с керамическими мембранными элементами.

На графиках рисунка 2 видно, что при концентрировании сквашенного молока происходит уменьшение скорости фильтрации с течением времени и сглаживание влияния давления. Из-за роста толщины осадка и его сжатия повышается гидродинамическое сопротивление осадка на мембране, что и является следствием данных эффектов.

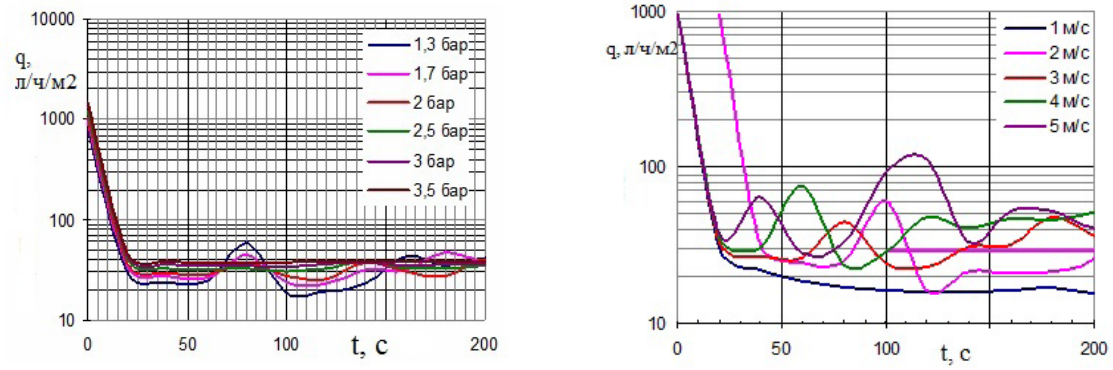
Установлено (рис. 3), что с увеличением трансмембранного перепада давления значение скорости фильтрации смещается к асимптотическому значению при любых концентрациях обрабатываемого сырья.

При выходе на стационарный режим фильтрации скорость потока резко изменяется вдоль поверхности мембраны.




*а)* *б)*

*Рисунок 2 – Изменение среднеинтегральной толщины осадка во времени процесса: (а) $W_z = 3$ м/с, $C_f = 0{,}14$ масс. дол.; (б) $\Delta p_{тм} = 1{,}7$ бар, $C_f = 0{,}14$ масс. дол. «Compiled by the authors»*




*а)* *б)*

*Рисунок 3 – Изменение среднеинтегральной скорости фильтрации:*
*(а) $W_z$ = 3 м/с, $C_f$ = 0,14 масс. дол.; (б) $\Delta p_{тм}$ = 1,7 бар, $C_f$ = 0,14 масс. дол. «Compiled by the authors»*

Значение указанного параметра уменьшается от начального (соответствует паспортной проницаемости мембранного керамического элемента) до конечного (зависит от толщины образовавшегося осадка).

Образцы сквашенного молока, пермеата и ретентата, собранные во время обработки, были проанализированы на содержание жира, лактозы и белка. Технологические параметры процесса приведены в таблице 1. При производстве творога традиционным способом выход продукта с аналогичным содержанием сухих веществ из такого же количества исходного сырья составит (13) [24]:

$$G_к = G_0 \frac{x_0 - x_p}{x_R - x_p} = 22 \frac{10{,}08 - 6{,}78}{17{,}9 - 6{,}78} = 6{,}53 \text{ кг}. \quad (13)$$

Сравнение модели расчета керамических ультрафильтрационных мембран с экспериментальными результатами получения творога традиционным способом позволяет отметить сокращение расхода молока (на 22,5%), увеличение выхода творога.

Необходимо отметить возможность регулирования состава конечного продукта и создание безотходных производств (дальнейшая переработка творожной сыворотки).

*Таблица 1 – Технологические параметры процесса ультрафильтрации и сравнительные характеристики творога, полученного на лабораторной установке и традиционным способом [20]*

| Наименование параметра | Исходное сырье | Ультрафильтрационная технология | | Традиционный способ | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Концентрат (творог) | Фильтрат (сыворотка) | Сыворотка | Творог |
| Кислотность, PH | 4,6 | - | 5,2 | 5,2 | 6,0 |
| Концентрация СВ, $x_0$ (%) | 10,08 | 17,9 | 5,65 | 6,78 | 18,0 |
| Из них: | | | | | |
| - белков, $x_б$ (%), в том числе | 3,2 | 11,05 | 0,12 | 1,16 | 14,0 |
| высокомолекулярных (казеин) | 2,6 | 8,97 | - | 0,59 | 0,22 |
| сывороточных | 0,6 | 1,96 | 0,12 | 0,57 | - |
| - жиров, $x_ж$ (%) | 0,28 | 0,28 | - | 0,02 | 3,2 |
| - лактоза, $x_л$ (%) | 5 | 5,3 | 5 | 4,8 | 2,5 |
| - минеральных веществ, $x_м$ (%) | 1,6 | 1,27 | 0,53 | 0,8 | 0,54 |
| Масса исходного сырья, $G_0$ (кг) | 22 | - | - | 22 | - |
| Масса творога, $G_к$ (кг) | - | 7,96 | - | - | 6,53 |
| Масса сыворотки, $G_ф$ (кг) | - | - | 14,04 | 15,5 | - |
| Расход сырья (молока), $G_0 / G_к$ | - | 2,76 | - | 3,38 | - |
| Фактор концентрирования по белку, $K_б$ | 3,45 | - | - | 3,45 | |
| Температура процесса, T (°C) | 50 | 50 | 50 | 36 | 36 |
| Средняя скорость фильтрации, $Q_ф$ (л/ч) | - | - | 7 | - | - |
| Давление в мембранном канале: | | | | | |
| - на входе, $(P_к)_{вх}$ (Па) | - | 450000 | - | - | - |
| - на выходе, $(P_к)_{вых}$ (Па) | - | 350000 | - | - | - |

**Обсуждение.** Наши исследования показали, что при расчетах установок для концентрирования сквашенного молока с применением керамических УФ-мембран большое влияние на процесс оказывает реологические характеристики перерабатываемого сырья. Эти результаты согласуются с данными, представленными в работах других авторов [26, 4, 14, 22]. Они сообщили, что ультрафильтрация почти в два раза экономит сырье. При этом полученный УФ-творог можно использовать как основу для производства других молочных продуктов.

В работе М. Торкаманзаде, М. Джаханшахи [27] приведены результаты влияния на общее гидравлическое сопротивление и сопротивление засорению размеров пор мембраны. Например, значения сопротивления для 50 кДа оказались больше, чем для 20 и 20 кДа. С увеличением времени обработки значения возрастают.

Влияние температуры на осадкообразование керамического ультрафильтрационного блока опи-

сано в работе [14]. С. Кенеф, Х. Малавика приводят данные, что с ростом температуры выше 50ºС увеличивается скорость фильтрации, снижается рост бактерий. При этом мембрана активно загрязняется фосфатом кальция, что описано Дж. Арендом, С. Кастолди [26].

С учетом полученных сведений в данной работе представлены результаты математического расчета гидродинамического сопротивления керамического УФ-мембранного элемента. Полученные результаты позволяют установить значения практически достижимых скоростей ультрафильтрации в стационарной фазе процесса.

**Выводы.** Данное исследование поможет переработчикам молока определить оптимальные параметры, необходимые для повышения энергоэффективности ультрафильтрации.

Расчет гидродинамического сопротивления мембранной установки для концентрирования сквашенного молока позволил установить, что:

– время выхода скорости процесса на постоянное значение составляет 20…500 с;

– при значениях концентраций белков 1…5% по массе стационарный режим практически невозможно реализовать. Следовательно, необходимо периодически удалять с поверхности мембран слоя отложившегося геля;

– скорости фильтрации при разности трансмембранного давления 1,5…2 бар наиболее оптимальны для концентрирования сквашенного молока;

– поддержание постоянной скорости ультрафильтрации при содержании белков в сквашенном молоке более 5% обеспечивается автоколебательным смывом осадка с поверхности мембраны касательным потоком циркулирующего ретентата. Внешне проявляется в периодическом изменении скорости ультрафильтрации, величина которой составляет в зависимости от скорости рециркуляции 20…50 (л/ч)/ м$^2$.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Agarkova E., Kruchinin A., Zolotaryov N., Pryanichnikova N., Belyakova Z. & Fedorova T. (2020) Processing cottage cheese whey components for functional food production. Foods and Raw Materials. 8 (1): 52-59.

2. Dong Zou, Yiqun Fan (2021) State-of-the-art developments in fabricating ceramic membranes with low energy consumption. Ceramics International. 47, 11: 14966-14987.

3. Panthi RR, Kelly AL, Sheehan JJ, Bulbul K, Vollmer AH & McMahon DJ. (2019) Influence of protein concentration and coagulation temperature on rennet-induced gelation characteristics and curd microstructure. J Dairy Sci. 102(1) : 177-189. doi: 10.3168/jds.2018-15039.

4. Gavazzi-April C., Benoit S., Doyen A., Britten M. & Pouliot Y. (2018) Preparation of milk protein concentrates by ultrafiltration and continuous diafiltration: Effect of process design on overall efficiency. J Dairy Sci. 101(11): 9670-9679. doi: 10.3168/jds.2018-14430.

5. Чумакова И.В., Донская Г.А. (2020) Изменение состава и физико-химических свойств молочного сырья при производстве безлактозного молока. Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – № 4 (84). – С. 193-197.

6. Дымар О.В. (2023) Мембранные технологии в молочной промышленности: прошлое, настоящее и будущее часть 1. Баромембранные процессы. Переработка молока. – 2023. – № 10 (288). – С. 16-22.

7. Paredes Valencia, A., Doyen, A., Benoit, S., Margni, M., & Pouliot, Y. (2018). Effect of ultrafiltration of milk prior to fermentation on mass balance and process efficiency in greek-style yogurt manufacture. Foods, 7(9). https://doi.org/10.3390/foods7090144.

8. Li Y., Corredig M. (2020) Acid induced gelation behavior of skim milk concentrated by membrane filtration. Journal of Texture Studies. – Т. 51. – № 1. – С. 101-110.

9. Quezada C., Estay H., Cassano A., Troncoso E. & Ruby-Figueroa R. (2021) Prediction of Permeate Flux in Ultrafiltration Processes: A Review of Modeling Approaches. Membranes (Basel). 11(5): 368. doi: 10.3390/membranes11050368.

10. Тимкин В.А. & Лазарев В.А. (2017) Производство творога по схеме микрофильтрация – ультрафильтрация. Молочная промышленность. 12: 51-55.

11. Корбатон-Багена М.Дж., Альварес-Бланко С., Винсент-Вела М.С. (2018) Оценка устойчивости к обрастанию во время ультрафильтрации модельных растворов сыворотки. J. Clean. Prod. 172: 358-367. doi: 10.1016 / j.jclepro.2017.10.149.

12. Bildyukevich A.V., Plisko T.V., Lipnizki F., Pratsenko S.A (2020) Correlation between membrane surface properties, polymer nature and fouling in skim milk ultrafiltration. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 605: 125387. doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.125387.

13. Fedosov S.V., Maslennikov V.A., Osadchii Y.P., Markelo A.V. (2020) Pressure loss along the channel of a tubular membrane during the ultrafiltration of liquid media. Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 54 (2): 380-387.

14. Kenneth S.Y.Ng, Malavika Haribabu, Dalton J.E.Harvie, Dave E.Dunstan, Gregory J.O.Martin. (2017) Mechanisms of flux decline in skim milk ultrafiltration: A review. Journal of Membrane Science. 523: 144-162. https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.09.036.

15. Дейниченко Г., Гузенко В., Удовенко О., Омельченко А., Мельник О. (2016). Изучение нового метода антиполяризации в процессе ультрафильтрации обжиженного молока. Восточно-Европейский журнал корпоративных технологий. Т. 6. – 11 (84): 4-8.

16. Лазарев В.А., Тихонов С.Л., Тихонова Н.В. (2017) Концентрирование аминокислот творожной сыворотки на керамических мембранах. Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии 5 (3): 39-44.

17. Ganga Sahay Meena, Ashish Kumar Singh, Sumit Arora, Sanket Borad, Rajan Sharma & Vijay K. Gupta. (2017) Physico-chemical, functional and rheological properties of milk protein concentrate 60 as affected by disodium phosphate addition, diafiltration and homogenization. J Food Sci Technol. 54(6): 1678–1688. doi: 10.1007/s13197-017-2600-1.

18. Wen-Qiong W, Yun-Chao W., Xiao-Feng Z., Rui-Xia G., Mao-Lin L. (2019) Whey protein membrane processing methods and membrane fouling mechanism analysis. Food Chem. 289: 468-481. doi: 10.1016/j.foodchem.2019.03.086.

19. Лобасенко Б.А., Сазонова Е.К., Мусаев П.А., Пачкин С.Г. (2017) Математическое моделирование и экспериментальные исследования мембранного концентрирования в аппаратах с отводом поляризационного слоя. Техника и технология пищевых производств. 3 (46): 152-159.

20. Водяков В.Н., Кувшинова О.А., Репин А.Д. (2020) Исследование процесса концентрирования молока ультрафильтрацией. Техника и оборудование для села. 5 (275): 27-31.

21. ГОСТ ISO 1736-2014 Молоко сухое и сухие молочные продукты. Определение содержания жира. Гравиметрический метод (контрольный метод). https://allgosts.ru/67/100/gost_iso_1736-2014

22. Бабенышев С.П., Брацихин А.А., Мамай Д.С., Мамай А.В., Нурулло М., Школа С.С. (2021) Комплексный процесс мембранной фильтрации вторичного молочного сырья. Молочная промышленность. 2: 58-61.

23. Кручинин А.Г., Илларионова Е.Е., Туровская С.Н., Стрижко М.Н., Бигаева А.В. (2021) Моделирование технологических свойств сухого молока путем использования баромембранных методов. Переработка молока. № 7 (261). – С. 6-9.

24. Лобасенко Б.А., Шафрай А.В., Просин М.В., Семенов А.Г., Какимов А.К., Акимов А.М. (2021) Разработка аппаратурной схемы и программы расчета мембранной установки, укомплектованной аппаратами с отводом поляризационного слоя. Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – Т. 83. – № 4 (90). – С. 37-42.

25. Lin Y.L. (2017). Effects of organic, biological and colloidal fouling on the removal of pharmaceuticals and personal care products by nanofiltration and reverse osmosis membranes. Journal of Membrane Science 542: 342-351. http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2017.08.023.

26. Arend G.D., Castoldi S.M., Rezzadori K., Soares L.S., Briao V.B. (2019) Concentration of skim milk by reverse osmosis: characterization and flow decline modeling. Braz. J. Food Technol. 22. https://doi.org/10.1590/1981-6723.02819.

27. Torkamanzadeh M., Jahanshahi M., Peyravi M., & Shokuhi Rad A. (2016). Comparative experimental study on fouling mechanisms in nano-porous membrane: Cheese whey ultrafiltration as a case study. Water Science and Technology 74(12): 2737-2750. http://dx.doi.org/10.2166/wst.2016.352.

*Статья поступила в редакцию 03.05.2024*
*Статья принята к публикации 17.06.2024*

УДК 641.81
EDN: NMYOHK

# РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СУФЛЕ ИЗ МИНТАЯ, ОБОГАЩЕННОГО ПОРОШКОМ ИЗ КОРНЯ ОДУВАНЧИКА

© Автор(ы) 2024

SPIN: 8373-3230
AuthorID: 1248313
ORCID: 0009-0009-2873-507X

**КОРОЛЕВ Александр Павлович,** аспирант
*Уральский государственный экономический университет*
*(620144, Россия, Екатеринбург, улица 8 Марта/Народной Воли, 62/45, e-mail: korolevshurik@gmail.com)*
SPIN: 3783-0793
AuthorID: 624167
ORCID: 0000-0003-1210-0845
ResearcherID: Б-4284-2017
ScopusID: 57218249440

**ФЕОФИЛАКТОВА Ольга Владимировна,** кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Технологии питания»
*Уральский государственный экономический университет*
*(620144, Россия, Екатеринбург, улица 8 Марта/Народной Воли, 62/45, e-mail: feofiov@usue.ru)*
SPIN: 4629-1238
AuthorID: 652714
ORCID: 0000-0001-9831-3635
ScopusID: 57219090330

**ПАНКРАТЬЕВА Наталья Анатольевна,** кандидат технических наук,
доцент кафедры «Технологии питания»
*Уральский государственный экономический университет*
*(620144, Россия, Екатеринбург, улица 8 Марта/Народной Воли, 62/45, e-mail: nata-pankratyeva@yandex.ru)*

**Аннотация.** Разработка технологии новых видов пищевых продуктов, способных обеспечить профилактику алиментарно-зависимых заболеваний в настоящее время не утрачивает своей актуальности. Расширение ассортимента блюд из рыбы функциональной направленности, обогащенных нетрадиционным растительным сырьем, способствует увеличению потребления полноценного белка и обеспечению профилактики дефицита нутриентов, необходимых организму человека для нормальной жизнедеятельности. В качестве основного сырья использовали рыбу минтай. Целью проведенных исследований являлась разработка технологии суфле рыбного из минтая, обогащенного порошком из корня одуванчика на основе формирования оптимальных сенсорных характеристик. Для обогащения суфле из минтая использовали нетрадиционное растительное сырье – корень одуванчика лекарственного, являющегося источником нутриентов, обеспечивающих профилактику алиментарных заболеваний. Разработаны рецептура и технология приготовления суфле из минтая, обогащенного корнем одуванчика, последняя представлена в виде аппаратно-технологической схемы. В процессе отработки рецептуры были сформированы высокие органолептические характеристики разработанного суфле. Результаты анализа химического состава на содержание пищевых волокон и сырой золы показали их увеличение в суфле из минтая, обогащенном корнем одуванчика по сравнению с контрольным образцом - суфле из минтая. Разработанное блюдо можно производить на любом предприятии общественного питания, что будет способствовать расширению ассортимента, а также росту потребления рыбной продукции.

**Ключевые слова:** суфле из рыбы, минтай, корень одуванчика лекарственного, обогащение, рецептура, технология, аппаратно-технологическая схема, пищевые волокна, сырая зола, органолептические показатели, химический состав.

# DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR POLLACK SOUFFLÉ ENRICHED WITH DANDELION ROOT POWDER

© The Author(s) 2024

**KOROLEV Alexander Pavlovich**, graduate student
*Ural State University of Economics*
*(620144, Russia, Ekaterinburg, street 8 Marta/Narodnoy Voli, 62/45, e-mail: korolevshurik@gmail.com)*
**FEOFILAKTOVA Olga Vladimirovna**, candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the food technology department
*Ural State University of Economics*
(*620144, Russia, Ekaterinburg, street 8 Marta/Narodnoy Voli, 62/45, e-mail: feofiov@usue.ru)*
**PANKRATIEVA Natalia Anatolievna**, candidate of technical sciences,

associate professor of the food technology department
*Ural State University of Economics*
*(620144, Russia, Ekaterinburg, street 8 Marta/Narodnoy Voli, 62/45, e-mail: nata-pankratyeva@yandex.ru)*

**Abstract.** The development of technology for new types of food products that can ensure the prevention of nutritional diseases currently does not lose its relevance. Expanding the range of functional fish dishes, enriched with non-traditional plant raw materials, helps to increase the consumption of complete protein and ensure the prevention of deficiency of nutrients necessary for the human body for normal life. Pollock fish was used as the main raw material. The purpose of the research was to develop a technology for fish soufflé from pollock, enriched with dandelion root powder based on the formation of optimal sensory characteristics. To enrich the pollock soufflé, we used non-traditional plant raw materials - dandelion root, which is a source of nutrients that ensure the prevention of nutritional diseases. A recipe and technology for preparing pollock soufflé enriched with dandelion root have been developed, the latter is presented in the form of a hardware-technological diagram. In the process of developing the recipe, high organoleptic characteristics of the developed soufflé were formed. The results of the analysis of the chemical composition for the content of dietary fiber and raw ash showed their increase in pollock soufflé enriched with dandelion root compared to the control sample - pollock soufflé. The developed dish can be produced at any catering establishment, which will help expand the range, as well as increase the consumption of fish products.

**Key words:** fish souffle, pollock, dandelion root, enrichment, recipe, technology, hardware-technological diagram, dietary fiber, raw ash, organoleptic characteristics, chemical composition.

***Для цитирования:*** *Королев А.П. Разработка технологии суфле из минтая, обогащенного порошком из корня одуванчика / А.П. Королев, О.В. Феофилактова, Н.А. Панкратьева // XXI век:итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 2(66). – С. 126-131. – EDN: NMYOHK.*

**Введение.** Алиментарно-зависимые заболевания являются глобальной проблемой в связи с тем, что они являются причиной порядка 70% смертей во всем мире. Концепция их профилактики с помощью функциональных пищевых ингредиентов получила широкое признание как в России, так и в зарубежных странах [1-3].

Ряд алиментарно-зависимых заболеваний возникает по причине дефицита белка в структуре питания населения: психические расстройства, недостаточность органов, саркопения, нарушение работы иммунной, гормональной систем организма и др. [4]. Как известно, важной составляющей полноценного, сбалансированного рациона питания является рыба, т.к. является источником полноценного белка, усвояемость которого превышает усвояемость мясного белка [5-8].

По данным Росстата уровень потребления рыбы в РФ за последние 10 лет снизился на 29,4% [9].

Для обеспечения населения полноценным питанием необходим поиск альтернативных технологических решений, одним из которых является расширение ассортимента блюд на основе рыбного сырья, в т.ч. обогащенного сырьевыми ингредиентами, имеющими функциональную направленность.

В настоящее время проведен ряд исследований, задачей которых являлось расширение ассортимента кулинарной продукции из рыбы с целью придания ей функциональной направленности [10].

Для формирования сбалансированного химического состава блюд в процессе разработки рецептуры основные ингредиенты дополняются вспомогательными, в т.ч. обогащающими пищевыми добавками с учетом оптимальных технологических, сенсорных характеристик, а также себестоимости и доступности.

В качестве обогащающего ингредиента можно рассматривать дикорастущее сырье, в том числе одуванчик лекарственный (*Taraxacum officinale*), широко используемый с древних времен в альтернативной медицине. Многочисленные исследования доказали его функциональные свойства за счет содержания в его составе широкого спектра функциональных пищевых ингредиентов, в т.ч. пребиотика инулина и пищевых волокон, способствующих нормализации деятельности желудочно-кишечного тракта, флавоноидов, обеспечивающих антиоксидантные свойства, стеринов, обладающих способностью снижать уровень холестерина в крови, а также дубильных веществ, органических кислот, целого ряда витаминов, микроэлементов, незаменимых жирных кислот и др. [11-16].

В качестве сырья для расширения ассортимента рыбных блюд можно использовать минтай. Данный вид рыбы характеризуется достаточно высоким содержанием белка (15,9%) и низким содержанием жира (0,9%) [17, 18]. Кроме того, ограничения поставок рыбы, связанные с санкционной политикой со стороны стран Запада, способствуют перспективам расширения ассортимента продукции из минтая [19].

Суфле – это блюдо, предполагающее измельчение сырья, добавление взбитых яичных белков, варку на пару или запекание [20]. Технология его приготовления способствует формированию высоких потребительских характеристик по показателям консистенция, вкус и усвояемость, отличных от характеристик самого рыбного сырья, что может способствовать росту потребительских предпочтений относительно рыбных блюд и, таким образом, повысить количество употребляемой рыбной продукции. Использование невостребованного рыбного сырья для приготовления данного блюда и

его обогащение функциональными пищевыми ингредиентами, будет способствовать расширению ассортимента продукции функциональной направленности с высокими потребительскими характеристиками.

Цель исследования – разработка технологии суфле рыбного из минтая, обогащенного порошком из корня одуванчика на основе формирования оптимальных сенсорных характеристик.

**Методология.** Экспериментальные исследования проводились на базе лабораторий ГАПОУ СО «Техникум индустрии питания и услуг «Кулинар» (г. Екатеринбург) и Единого лабораторного комплекса ФГБОУ ВО «Уральский государственный экономический университет» (г. Екатеринбург).

В качестве основного сырья для приготовления суфле использовали минтай обезглавленный замороженный потрошеный по ТУ10.20.13-582-37676459-2017; яйцо куриное первой категории (АО «Птицефабрика «Боровская») по ГОСТ 31654-2012; сливки Петмол ультрапастеризованные 22% (ОАО "Юнимилк", Россия) по ТУ 9222-010-05300037-2008; лук репчатый свежий по ГОСТ 34306-2017; масло сладко-сливочное крестьянское несоленое с массовой долей жира 72,5%, высший сорт (АО «Ирбитский молочный завод») по ГОСТ 32261-2013; соль поваренную пищевую Илецкую, помола №1 (ОАО «Илецксоль») по ГОСТ Р 51574-2000.

Для обогащения суфле использовали порошок высушенного корня одуванчика лекарственного с массовой долей влаги не более 7%, собранного в Ирбитском районе Свердловской области в августе 2023 г. Корни и корневища одуванчика сортировали и отбирали по качеству, освобождали от примесей, промывали холодной проточной водой, чистили, нарезали пластинами толщиной от 3 до 6 мм и сушили в дегидраторе *EKSI EKD* 10 при температуре 120°F в течение 8 часов. Измельчение корня одуванчика производили с помощью мельницы лабораторной ЛЗМ-1М (размер частиц не более 150 мкм).

Для приготовления суфле использовали миксер планетарный *HURAKAN HKN-KS5;* блендер *Braun HB701AI-MQ7035X*; блендер *EKSI B2 Multi Pro*; пароконвектомат *XEVC-0511-E1R UNOX.*

Отбор проб для проведения испытаний осуществляли согласно ГОСТ 26671-2014. Органолептическую оценку опытных образцов проводили в соответствии с ГОСТ Р 53161-2008.

Определение содержания пищевых волокон осуществляли в соответствии с ГОСТ 31675-2012 путем последовательной обработки навески испытуемой пробы растворами кислоты и щелочи, озолении и количественном определении органического остатка весовым методом. Содержание общей золы определяли согласно стандартной методике, основанной на высушивании, обугливании, озолении при температуре (550 + 25)°С по ГОСТ 31795-2012.

**Результаты.** На основании ряда экспериментальных данных, полученных в ходе исследования, была составлена рецептура суфле из минтая, обогащенного корнем одуванчика (табл. 1).

Технология приготовления суфле из минтая, обогащенного корнем одуванчика включала следующие операции: разделку минтая на чистое филе, нарезку на мелкие кусочки, нарезку лука репчатого мелким кубиком и пассеровку на сливочном масле; разделение обработанного яйца на белок и желток; взбивание белка с использованием планетарного миксера; закладку подготовленных минтая и лука в чашу блендера, добавление сливок, порошка из корня одуванчика и измельчение всех компонентов; добавление взбитых в пену белков, перемешивание; порционирование по 68 г в силиконовые формы и помещение в пароконвектомат на режим пар (влажность 100%), приготовление в течение 12 минут при температуре 100°С (рис. 1).

Производственные потери составили 3 грамма, потери при тепловой обработке составили – 5,5%.

В ходе отработки рецептуры были сформированы высокие сенсорные характеристики разработанного суфле.

Результаты органолептической оценки опытных образцов суфле из минтая с корнем одуванчика представлены в таблице 2.

*Таблица 1 – Рецептура суфле из минтая, обогащенного корнем одуванчика*

| № п/п | Наименование | Масса брутто, г | Масса нетто, г |
|---|---|---|---|
| 1 | Рыба минтай обезглавленный замороженный | 270 | 200 |
| 2 | Яйцо (белок) | 46 | 20 (белок) |
| 3 | Сливки (м.д.ж. 22%) | 53 | 50 |
| 4 | Лук репчатый свежий | 43 | 38 |
| | Пассерованный лук | | 24 |
| 5 | Масло сливочное (м.д.ж. )72,5% | 20 | 20 |
| 6 | Соль | 3 | 3 |
| 7 | Корень одуванчика (порошок) | 5 | 5 |
| | Масса полуфабриката, г | | 290 (4 шт по 68) |
| | Выход готового блюда, г | | 240 (4 шт по 60) |

*Таблица 2 – Органолептические показатели суфле из минтая, обогащенного корнем одуванчика, и их характеристика*

| Наименование показателя | Характеристика |
|---|---|
| Цвет | на срезе серый, верхней корочки - слегка золотистый |
| Вкус | приятный, рыбный, слегка соленый, легкий сливочный привкус |
| Запах | приятный, рыбный с легким ароматом сливок |
| Консистенция | сочная, мягкая, однородная |
| Внешний вид | пористая, однородная воздушная масса, правильной формы с глянцевой корочкой на поверхности |

Цвет суфле свойственен цвету основного сырья – мяса рыбы, подвергнутого тепловой обработке, при запекании у верхней корочки формируется слегка золотистый цвет. Добавление в рецептуру таких ингредиентов как сливки и репчатого лука, пассированного на сливочном масле, способствует формированию приятных, гармоничных вкуса и запаха со сливочным привкусом и ароматом сливок. Обогащение суфле из минтая порошком из корня одуванчика в установленном в рецептуре количестве не оказывает влияния на его вкусо-ароматические характеристики.

Консистенция суфле формируется за счет сливок и порошка из корня одуванчика без добавления крахмалосодержащих продуктов. Изделия характеризуются соответствующим наименованию внешним видом. Внешний вид суфле из минтая, обогащенного порошком из корня одуванчика, представлен на рисунке 2.

Проведены исследования на содержание пищевых волокон и сырой золы в разработанном суфле из минтая.

Результаты исследования представлены на рисунке 3.

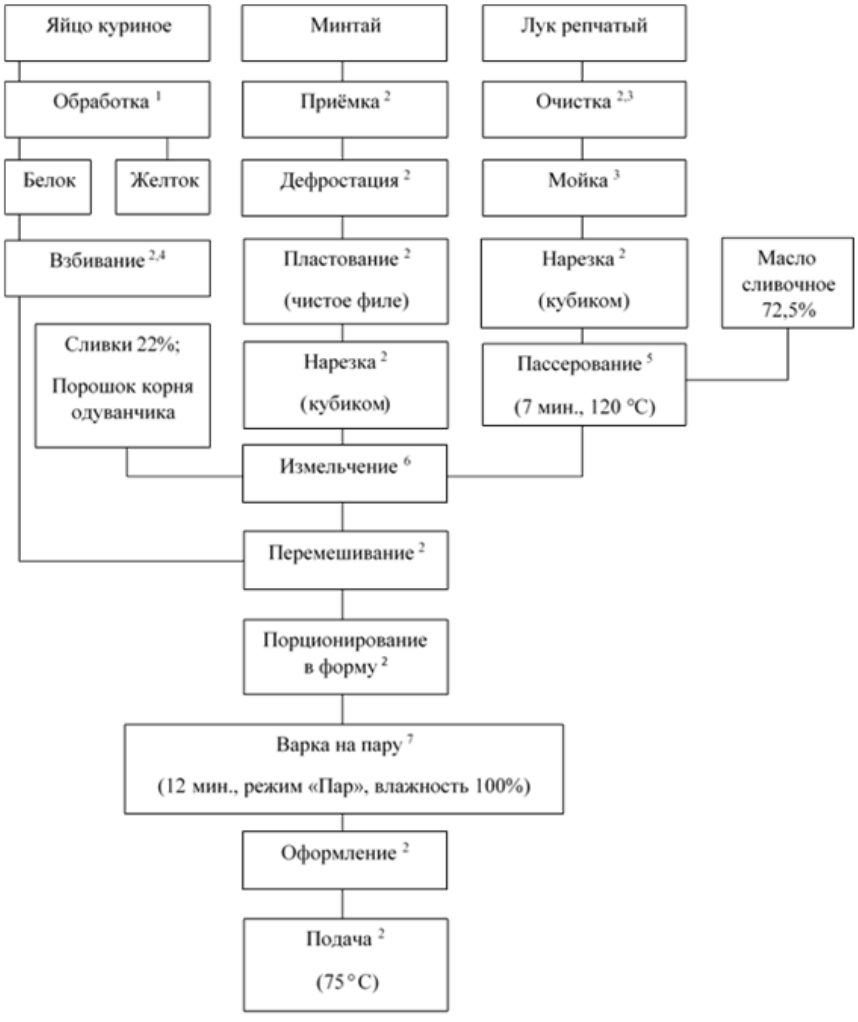



*Рисунок 1 – Аппаратно-технологическая схема приготовления суфле из минтая, обогащенного порошком из корня одуванчика:*
*1 – Ванна моечная для обработки яиц ВМЛЯ-700; 2 – Стол производственный СП-1250; 3 – Ванна моечная ВМ-2; 4 – Планетарный миксер HURAKAN HKN-KS5; 5 – Плита электрическая ЭП-4П; 6 – Блендер Braun HB701AI-MQ7035X; 7 – Пароконвектомат XEVC-0511-E1R UNOX*



*а) вид на срезе* *б) форма и внешний вид*

*Рисунок 2 – Внешний вид суфле из минтая, обогащенного порошком из корня одуванчика*

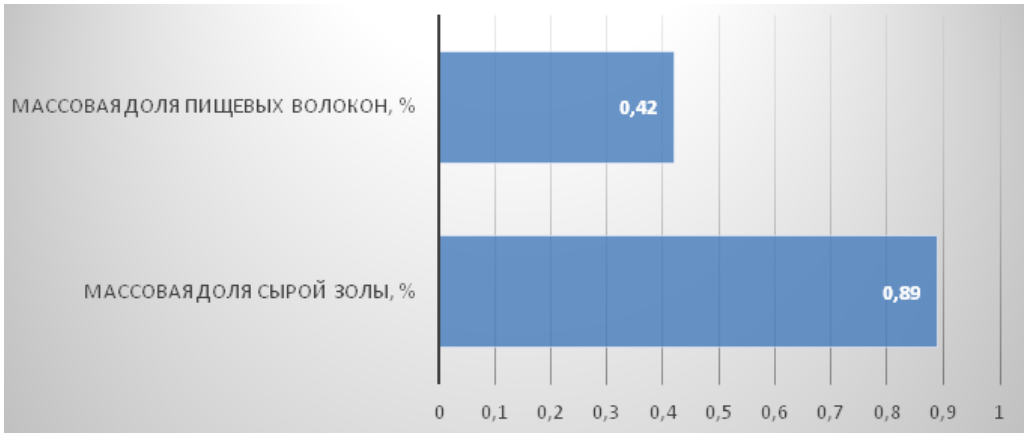



*Рисунок 3 – Результаты анализа суфле из минтая, обогащенного порошком из корня одуванчика, на содержание пищевых волокон и сырой золы*

Содержание пищевых волокон в суфле из минтая обеспечивается за счет его обогащения порошком из корня одуванчика, что придает ему дополнительную физиологическую ценность.

**Обсуждение.** Применение минтая – одного из наиболее распространенных видов рыбы в технологии продукции общественного питания может обеспечить профилактику ряда алиментарно-зависимых заболеваний. Помимо обеспечения роста мышечной ткани за счет эффекта, свойственного любому белку, водорастворимый белок мяса минтая является новым функциональным пищевым ингредиентом, обладающим противовоспалительным потенциалом. Он ослабляет экспрессию генов, участвующих в пути *TLR4-MyD88* в макрофагах и печени, и подавляет воспаление [21, 22]. Кроме того, исследования показали, что обогащение суфле из минтая порошком из корня одуванчика способствует повышению пищевой ценности готового блюда. Данное растительное сырье является многообещающим источником для профилактики и лечения заболеваний, обладающим защитным действием против гепатотоксичности, окислительного стресса, пролиферации раковых клеток, что согласуется с результатами исследований, представленными в научной литературе [14, 15]. Проведен ряд исследований по обогащению порошком из корня одуванчика различных пищевых продуктов, в том числе разработан паштет из минтая с корнем одуванчика [23-26].

Следовательно, разработанное суфле из минтая, обогащенное корнем одуванчика, является источником полноценного белка с противовоспалительным потенциалом, пищевых волокон, инулина, минеральных веществ и др., обладающих способностью обеспечивать профилактику алиментарно-зависимых заболеваний, в том числе связанных с дефицитом белка, нарушениями нормальной деятельности желудочно-кишечного тракта.

Исследования подтвердили возможность получения блюда из рыбы, характеризующегося высокими значениями органолептических показателей, что согласуется с уже имеющимся опытом обоснования рецептурных составов и технологической модификации рецептур, способствующих расширению ассортимента блюд из рыбы, обладающих способностью повысить степень удовлетворения физиологической потребности человека в различных пищевых веществах [10, 17, 18]. Это подтверждает целесообразность расширения ассортимента функциональных продуктов питания в рамках концепции профилактики алиментарно-зависимых заболеваний.

**Выводы.** В рамках проведенных исследований разработана технология суфле из минтая, обогащен-

ного порошком из корня одуванчика. Составлена аппаратно-технологическая схема его приготовления, учитывающая основные стадии технологического процесса и необходимое оборудование. Исходя из практически отработанного соотношения рецептурных компонентов сформированы высокие органолептические характеристики нового продукта по показателям цвет, вкус, запах, консистенция и внешний вид, что может способствовать формированию потребительских предпочтений к нему (что входит в задачи дальнейших научных исследований). Полученные в ходе исследования результаты показали, что физиологическая ценность суфле из минтая повышается за счет добавления порошка из корней одуванчика, что способствует содержанию пищевых волокон в количестве 0,42 % и дополнительному количеству ФПИ, в т.ч. минеральных веществ в готовом продукте. Обогащение блюд из рыбы нетрадиционным растительным сырьем является перспективным направлением повышения их потребительских свойств. Разработанный продукт будет способствовать не только расширению ассортимента рыбной продукции, но и увеличению спроса на нее, и, как следствие, уровня потребления рыбы.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Бурляева Е.А., Камбаров А.О., Никитюк Д.Б. Изменение структуры питания населения России за 100 лет // Клиническое питание и метаболизм. – 2020. – Т. 1. – №1. – С. 17-26. DOI: 10.17816/clinutr21188.

2. Евстратова, В.С. Структура потребления макронутриентов населением различных регионов Российской Федерации / В.С. Евстратова, Р.М. Раджабкадиев, Р.А. Ханферьян // Вопросы питания. – 2018. – Т. 87. – № 2. – С. 34-38. – DOI 10.24411/0042-8833-2018-10016.

3. An, Peng & Luo, Yongting & Yang, Aimin & Li, Jinhui. (2024). Editorial: Micronutrients and metabolic diseases. Frontiers in Nutrition. – 11. – 10.3389/fnut.2024.1380743.

4. Khan, Alamgir & Khan, Salahuddin. (2017). Health complication caused by protein deficiency. Journal of Food Sciences & Nutrition. – 1. – 1-2. 10.35841/aajfsn.1000101.

5. Справочно-информационный материал для реализации, обучающей (просветительской) программы вопросам здорового питания для работающих в тяжелых и вредных условиях труда. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_369924/35ecee7500af39046508a3d858394a803c7c9982/(дата обращения: 17.04.2024).

6. G. Lozano, A. Hardisson, FISH | Fish as Food, Editor(s): Benjamin Caballero, Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition (Second Edition), Academic Press, 2003, Pages 2417-2423. ISBN 9780122270550, https://doi.org/10.1016/B0-12-227055-X/00467-3.

7. Николаева, М.А. Влияние потребительских свойств рыбных товаров на здоровье человека / М.А. Николаева, Т.Г. Родина // Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов. – 2019. – № 2(55). – С. 56-61.

8. Шульгина Л.В., Павель К.Г., Солодова Е.А., Якуш Е.В. Липидный профиль и диетическая ценность консервированных продуктов из сардины иваси // Индустрия питания|Food Industry. – 2023. – Т. 8. – № 3. – С. 123-133. DOI: 10.29141/2500-1922- 2023-8-3-13.

9. Потребление основных продуктов питания по Российской Федерации / Федеральная служба государственной статистики. – URL: https://rosstat.gov.ru/ https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/smd_3-23.xlsx (дата обращения: 17.04.2024).

10. Tsibizova, M. (2018). Expansion of assortment of culinary products from the grown fish. Vestnik MGTU. 21. 513-523. 10.21443/1560-9278-2018-21-3-513-523.

11. Туманова А.Е., Типсина Н.Н., Струпан Е.А., Сизых О.А., Яброва О.А. Дикорастущее растительное сырьё – источник обогащающих добавок к пище // Хлебопродукты. – 2021. – № 12. – С. 48-51.

12. Учасов Д.С., Кузнецова Е.А., Шалаева А.А. Taraxacum officinale как перспективный источник биологически активных веществ // Парадигмальные установки естественных и гуманитарных наук: междисциплинарный аспект: материалы XVI Международной научно-практической конференции: в 3-х ч. Ч. 1. – Ростов-на-Дону, 2021. – С. 134-137.

13. Евстафьев С.Н., Тигунцева Н.П. Биологически активные вещества одуванчика лекарственного Taraxacum officinale Wigg (обзор) // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. – 2014. – № 1(6). – С. 18-29.

14. Fan M, Zhang X, Song H, Zhang Y. Dandelion (genus Taraxacum): a review of chemical components and pharmacological effects. Molecules. June 27, 2023; 28 (13): 5022. DOI: 10.3390/ molecules28135022.

15. Di Napoli A, Zucchetti P.A. A Comprehensive Review of the Human Health Benefits of Taraxacum officinale. Bull Natl Res Cent. 2021; 45:110. DOI: 10.1186/s42269-021-00567-1.

16. Справочник лекарственных растений. – Москва: Мир книги, 2011. – ISBN 978-5-486-03878-5.

17. Стаценко Е.С. Разработка технологии кулинарного изделия с использованием обогащающей добавки на основе сои и ламинарии / Е.С. Стаценко // Достижения науки и техники АПК. – 2020. – Т. 34. – № 8. – С. 107-110. – DOI: 10.24411/0235-2451-2020-10819.

18. Brazhnaia, I & Tifanyuk, A & Kulik, O & Sudak, C. (2019). Development of fish soups technology with using food supplements from fish remaining feedstock. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 302. 012016. 10.1088/1755-1315/302/1/012016.

19. Сёмин А.Н., Труба А.С. Российский рынок минтая: современное состояние и пути его развития. Труды ВНИРО. 2023;193:216-221. https://doi.org/10.36038/2307-3497-2023-193-216-221

20. Похлёбкин В.В. Суфле // Кулинарный словарь. – М.: Издательство «Э», 2015. – С. 344. – 456 с. – 4000 экз. — ISBN 978-5-699-75127-3.

21. Masataka Ono, Satomi Watari, Mizuho Nishizawa-Higashi, Tatsuya Konishi, Yoshinori Takahashi, Hiroki Saeki, Ga-Hyun Joe, Water-soluble protein from walleye pollock (Gadus chalcogrammus) suppresses lipopolysaccharide-induced inflammation by attenuating TLR4–MyD88 expression in macrophages, Food Chemistry: Molecular Sciences, Volume 6, 2023, 100165, https://doi.org/10.1016/j.fochms.2023.100165.

22. Uchida K. et al. Dietary Alaska pollack protein induces acute and sustainable skeletal muscle hypertrophy in rats //Nutrients. – 2022. – Т. 14. – №. 3. – С. 547.

23. Использование корня одуванчика лекарственного в технологии хлеба функционального назначения / А.П. Королев, О.В. Феофилактова, Н.В. Заворохина, А.В. Тарасов // Новые технологии. – 2023. – Т. 19. – № 4. – С. 103-110. – DOI: 10.47370/2072-0920-2023-19-4-103-110. – EDN: GZTXSX.

24. Патент № 2416213 C1 Российская Федерация, МПК A23F 5/44, A23F 5/00, A23L 2/39. способ производства напитка из корня одуванчика и лимонов: № 2009147132/10: заявл. 21.12.2009: опубл. 20.04.2011 / О.И. Квасенков. – EDN: ONKUAQ.

25. Кузнецова, Е.М. Разработка технологии паштета на основе минтая с корнем одуванчика / Е.М. Кузнецова // Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промысловое и техническое использование: Материалы XII Национальной (всероссийской) научно-практической конференции, Петропавловск-Камчатский, 28-29 апреля 2021 года. Том Часть II. – Петропавловск-Камчатский: Камчатский государственный технический университет, 2021. – С. 77-80. – EDN: OIPUJK.

26. Мякиньков, А.Г. 1068. Использование экстракта дикорастущих трав при производстве кисломолочного напитка [Использование экстракта корней одуванчика]. Долматова О.И., Пожидаева Е.А., Гребенкина А.Г. // Пищ. пром-сть. – 2017. – N 12. – С. 26-28.

*Статья поступила в редакцию 30.04.2024*
*Статья принята к публикации 17.06.2024*

УДК 614.8.084
EDN: ZWNPJR

# СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ТРУДА МАШИНИСТОВ АВТОМОТРИС ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КАК НАГРЕВАЮЩЕГО, ТАК И ОХЛАЖДАЮЩЕГО МИКРОКЛИМАТА

© Автор(ы) 2024

SPIN: 5335-1258
Author ID: 1176830
ORCID: 0009-0007-1718-6170

**БАЛАНОВ Игорь Андреевич,** аспирант кафедры «Безопасность жизнедеятельности»
*Ростовский государственный университет путей сообщения*
*(344038, Россия, Ростов-на-Дону, площадь Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, дом 2, e-mail: igor.balanov@bk.ru)*

SPIN: 3720-4160
Author ID: 140003
ORCID: 0000-0003-0644-7412
Researcher ID: E-8171-2014
Scopus ID: 56958488600

**БУЛЫГИН Юрий Игоревич,** доктор технических наук, профессор,
доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности»
*Ростовский государственный университет путей сообщения*
*(344038, Россия, Ростов-на-Дону, площадь Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, дом 2, e-mail: bulyur_rostov@mail.ru)*

SPIN: 9194-1862
Author ID: 1210217
ORCID: 0009-0004-2046-8804
Researcher ID: KFS-3954-2024
Scopus ID: 58695164400

**ГУМЕНЮК Алексей Сергеевич,** магистр
кафедры «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды»
*Донской государственный технический университет*
*(344003, Россия, Ростов-на-Дону, площадь Гагарина, дом 1, e-mail: gumenyuk_as@bk.ru)*

SPIN: 4312-7031
Author ID: 488466
ORCID: 0000-0001-8937-8875
Researcher ID: AAK-2313-2021
Scopus ID: 57200217082

**ЯИЦКОВ Иван Анатольевич,** доктор технических наук, профессор,
декан Электромеханического факультета
*Ростовский государственный университет путей сообщения*
*(344038, Россия, Ростов-на-Дону, площадь Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, дом 2, e-mail: yia@rgups.ru)*

**Аннотация.** Представлены исследовательский анализ и комплексное сопоставление данных о параметрах микроклимата в кабинах автомотрис, с учётом различных факторов внутренней среды. Экспериментальной основой исследования служит эмпирический массив результатов проведения специальной оценки условий труда на рабочих местах машинистов автомотрис, содержащий также информацию о типе воздействующего микроклимата (нагревающий / охлаждающий), расположении точек измерения параметров, функционировании систем кондиционирования и отопления, установленном классе условий труда. При помощи методов описательной статистики и программных средств визуализации данных определены характеристики распределений критически важных величин (температуры и индекса тепловой нагрузки среды), а также степень их связи с прочими внутренними факторами. Установлено, что распределения указанных параметров микроклимата значительно отличаются от нормального, но при этом состоят из нескольких компонентов, каждый из которых близок к нормальному закону и представляет собой отдельный класс условий труда. Результаты исследования представляют собой экспериментально-теоретическую основу для разработки и валидации математических моделей тепломассопереноса в кабинах автомотрис и последующего проектирования систем нормализации микроклимата для путевых машин.

**Ключевые слова**: автомотриса, условия труда, микроклимат кабины, индекс тепловой нагрузки среды, статистический анализ, распределение случайной величины.

# TRANSFORMATION OF ENVIRONMENTAL PARAMETERS INTO INDICATORS OF PRODUCTION RISK AT ENTERPRISES

© The Author(s) 2024

**BALANOV Igor Andreevich**, graduate student of the Department of "Life Safety"
*Rostov State Transport University*
*(344038, Russia, Rostov-on-Don, Rostov Infantry Regiment Square, house 2, e-mail: igor.balanov@bk.ru)*
**BULYGIN Yuri Igorevich**, doctor of technical sciences, professor of the Department of "Life Safety"
*Rostov State Transport University*
*(344038, Russia, Rostov-on-Don, Rostov Infantry Regiment Square, house 2, e-mail: bulyur_rostov@mail.ru)*
**GUMENYUK Alexey Sergeevich**, master's student of the Department of "Life Safety
*Don State Technical University*
*(344038, Russia, Rostov-on-Don, Rostov Infantry Regiment Square, house 2, e-mail: gumenyuk_as@bk.ru)*
**YAITSKOV Ivan Anatolyevich**, doctor of technical sciences, professor, dean of the Faculty of Electromechanics
*Rostov State Transport University*
*(344038, Russia, Rostov-on-Don, Rostov Infantry Regiment Square, house 2, e-mail: yia@rgups.ru)*

**Abstract.** A research analysis and a comprehensive comparison of data on the parameters of the microclimate in the cabins of the autopotris, taking into account various factors of the internal environment, are presented. The experimental basis of the study is an empirical array of results of a special assessment of working conditions at the workplaces of automotris machinists, which also contains information about the type of influencing microclimate (heating / cooling), the location of measurement points, the functioning of air conditioning and heating systems, and the established class of working conditions. Using descriptive statistics methods and data visualization software, the characteristics of the distributions of critical quantities (temperature and thermal load index of the medium), as well as the degree of their relationship with other internal factors, are determined. It has been established that the distributions of these microclimate parameters differ significantly from normal, but at the same time consist of several components, each of which is close

**Keywords:** car inspection, working conditions, cabin microclimate, environmental heat load index, statistical analysis, random variable distribution.

***Для цитирования:*** *Баланов И.А. Сравнительный анализ условий труда машинистов автомотрис при воздействии как нагревающего, так и охлаждающего микроклимата / И.А. Баланов, Ю.И. Булыгин, А.С. Гуменюк, И.А. Яицков // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 2(66). – С. 132-140. – EDN: ZWNPJR.*

**Введение.** Эксплуатация автомотрис, как и других видов путевых машин, осуществляется круглосуточно в различных регионах страны, в широком диапазоне климатических условий [1, 2]. При этом условия труда машинистов зачастую оцениваются как вредные, а иногда и опасные. Всё это актуализирует задачу нормализации микроклимата в кабинах путевой техники [3, 4].

Объектом исследования выбраны автомотрисы грузовые дизельные марки АГД-1А, эксплуатируемые на различных железнодорожных предприятиях в течение всего 2020 года.

Цель исследования – обобщение и анализ эмпирического материала, полученного при специальной оценке условий труда (СОУТ) по микроклиматическому фактору.

В работе [5] авторами было представлено статистическое описание параметров микроклимата в кабинах автомотрис только в условиях нагревающего микроклимата, основанное на данных СОУТ о 19 автомотрисах. Именно по причине ограниченности массива исходных данных не представлялось возможным достоверно определить зависимости параметров микроклимата в кабине от различных факторов внутренней среды, а для их адекватной оценки необходимы дополнительные натурные измерения в существенно расширенной выборке эксплуатационных условий.

**Методология.** Цель статьи заключается в анализе условий труда машинистов автомотрисы при воздействии неблагоприятного микроклимата.

Для реализации поставленных задач в работе используется расширенная выборка результатов СОУТ и производственного контроля 110 различных автомотрис, задействованных по всему югу России, причём как в условиях нагревающего, так и охлаждающего микроклимата. Исходный массив получен авторами благодаря обращению к базам данных НПЦ «Охрана труда» ОНИИЦ НИЧ РГУПС (г. Ростов-на-Дону).

При проведении СОУТ исследованы следующие параметры микроклимата кабины: температура воздуха, индекс тепловой нагрузки среды (ТНС-индекс), скорость движения воздуха и его относительная влажность. Измерения каждого из перечисленных показателей проведены многократно на двух различных уровнях по вертикали (расстояниях от пола кабины): 0.1 м и 1 м или же 0.1 м и 1.5 м в зависимости от конкретной автомотрисы.

Кроме того, рассмотренная выборка содержит информацию о функционировании систем кондиционирования и отопления, а также классе условий труда (КУТ), установленном при помощи автоматизированного программного обеспечения,

разработанного Клинским институтом охраны и условий труда.

Таким образом, собран обширный фактический материал, достаточный для его обобщения и анализа. Именно на эти результаты опираются математические модели тепломассопереноса в кабинах автомотрис (а также и другой путевой техники), необходимые для проектирования оптимальных систем нормализации микроклимата [6-8].

Значения ТНС-индекса в кабинах 55 автомотрис ОАО РЖД в условиях нагревающего микроклимата, рассчитанные в ходе СОУТ по результатам экспериментальной фиксации температуры воздуха, скорости его движения и относительной влажности, отражены на рисунке 1. Данные разбиты на 3 группы по оси ординат в зависимости от высоты точки измерения в кабине (0.1 м, 1.0 м, 1.5 м), а также установленного КУТ, обозначенного цветом.

Таким же образом на рисунке 2 представлена визуализация температуры в кабинах 55 автомотрис на различной высоте при охлаждающем микроклимате. Отличие от предыдущего графика состоит лишь в том, что измерения на высоте 1.5 м от пола не проводились.

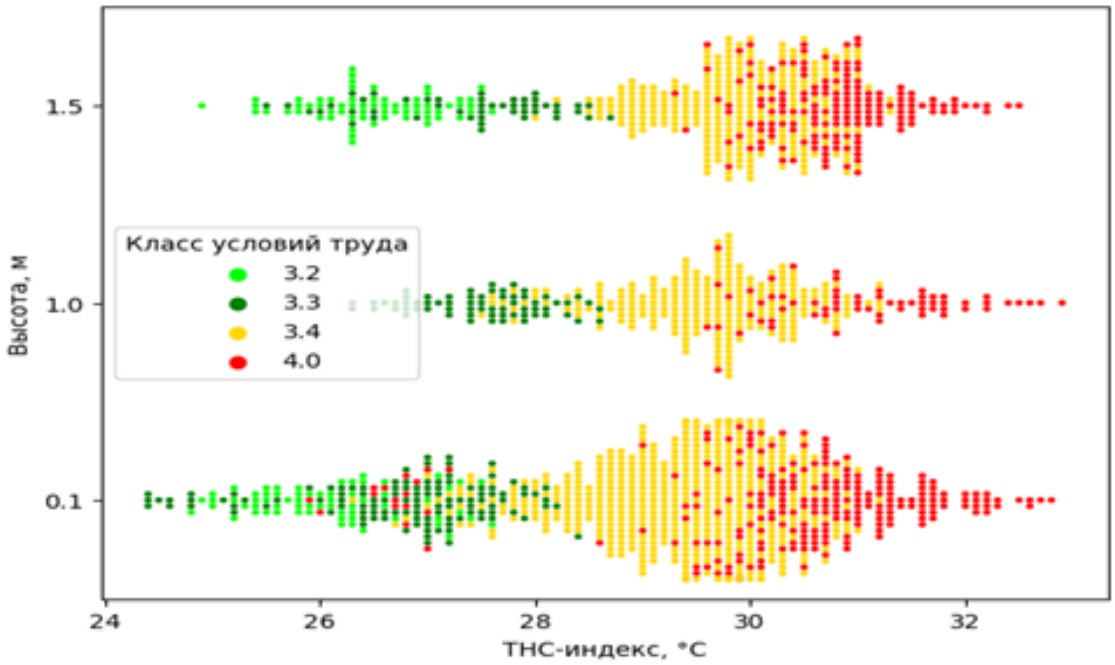



*Рисунок 1 – ТНС-индекс в кабинах автомотрис на различной высоте от пола с учётом КУТ*

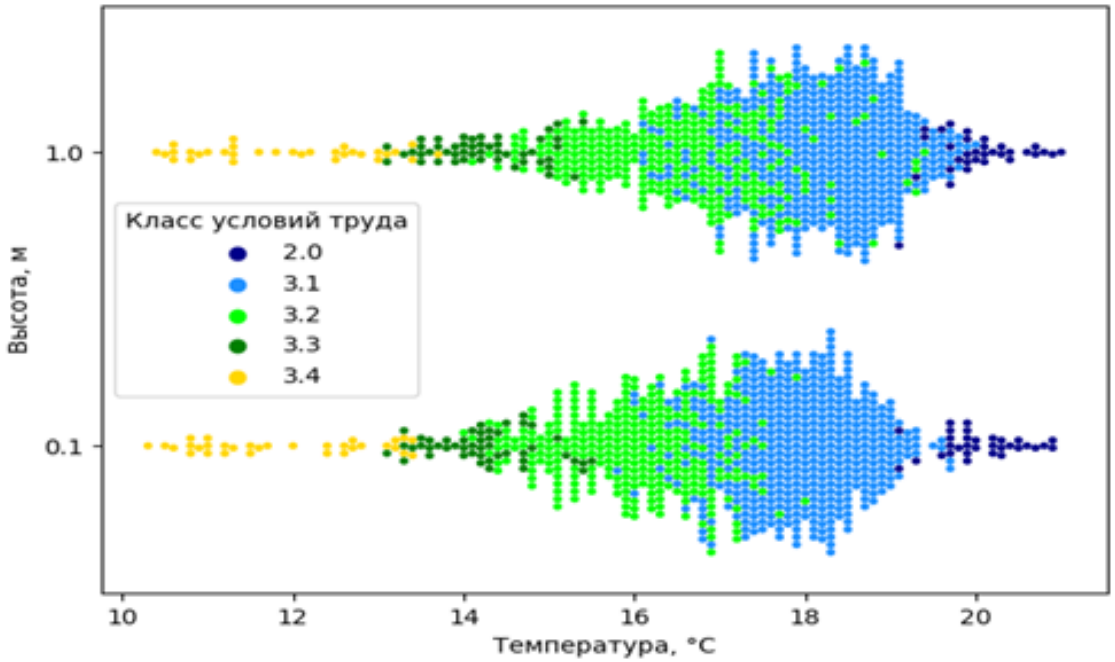



*Рисунок 2 – Температура в кабинах автомотрис на различной высоте от пола с учётом КУТ*

**Результаты.** Основываясь на приведенных выше графиках (рис. 1, 2), отметим, что машинист автомотрисы при работе в условиях нагревающего микроклимата подвергается значительно более негативному воздействию, чем при работе в охлаждающем. Именно в первом случае число машин с крайне неудовлетворительными КУТ 3.4 и КУТ 4 по данному фактору значительно больше, так как в тёплый период года THC-индекс в кабине часто превышает 28-30°C. Однако, даже в таких кабинах иногда наблюдаются значения менее 27°C, что не изменяет картину в целом.

Ситуация в холодный период года несколько иная. Температура в кабине автомотрисы на разных высотах от пола находится, в основном, в диапазоне 16-19°C. Более того, КУТ 2, соответствующий допустимым санитарно-гигиеническим нормативам, наблюдается только здесь и крайне редко. Стоит отметить, что во многих автомотрисах функционирует система отопления.

Далее рассмотрим эмпирические распределения температуры и THC индекса как наиболее информативных показателей с целью описания ключевых особенностей данных и определения возможности построения соответствующих математических моделей. Рисунок 3 содержит гистограммы и оценки плотности указанных параметров в условиях нагревающего микроклимата для различных высот, пунктиром отмечены медиана и квартили распределений.

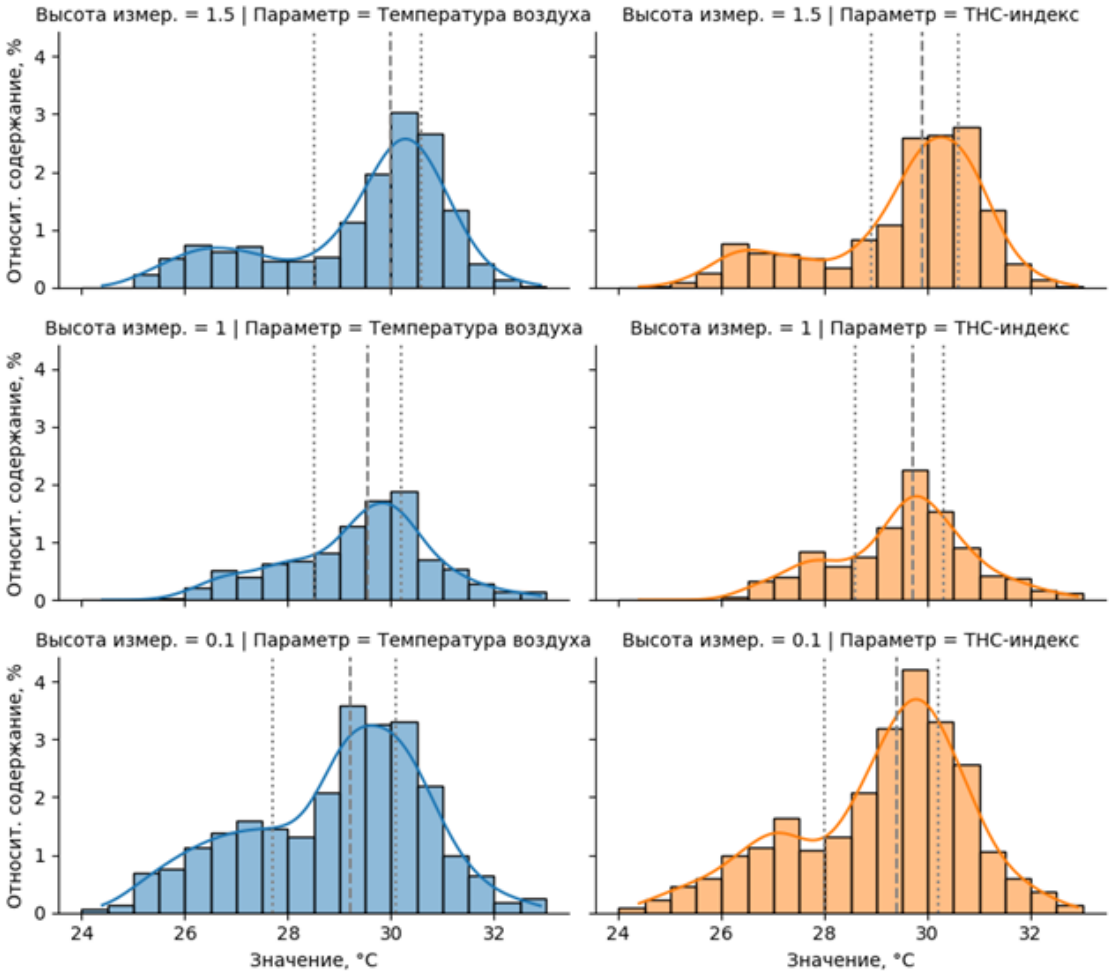



*Рисунок 3 – Гистограммы распределений температуры и THC-индекса в кабинах при воздействии нагревающего микроклимата*

Сперва следует отметить, что распределения рассмотренных параметров микроклимата имеют два явно выраженных пика, один из которых является преобладающим, а другой становится заметен лишь при достаточном объёме данных (на высотах в 0.1 м и 1.5 м). Кроме того, имеет место существенная асимметрия, оценить которую вполне удобно, обратив внимание на оценку плотности и расстояния между квартилями. При этом, чем выше от пола находится точка измерения, тем в среднем выше и температура, что может свидетельствовать о слабом перемешивании внутреннего воздуха.

На рисунке 4 представлена аналогичная визуализация распределений температуры для случая охлаждающего микроклимата.

С точки зрения статистики здесь (рис. 5) наблюдается схожая ситуация, за исключением того факта, что распределение становится одномодальным, т.е.

один из пиков практически отсутствует и имеются лишь немногочисленные экстремальные значения. Остальные особенности данных сохраняются, включая и заметную асимметрию, несмотря на примерно равные расстояния между квартилями.

Установить причину такой специфики рассмотренных распределений становится возможно, изучив содержание каждого КУТ в исходной выборке. На рисунке 5 представлены подходящие для этого гистограммы, а в таблице 1 соответствующая им описательная статистика.

Аналогичные визуализации и численные характеристики для условий охлаждающего микроклимата приведены на рисунке 6 и в таблице 2.

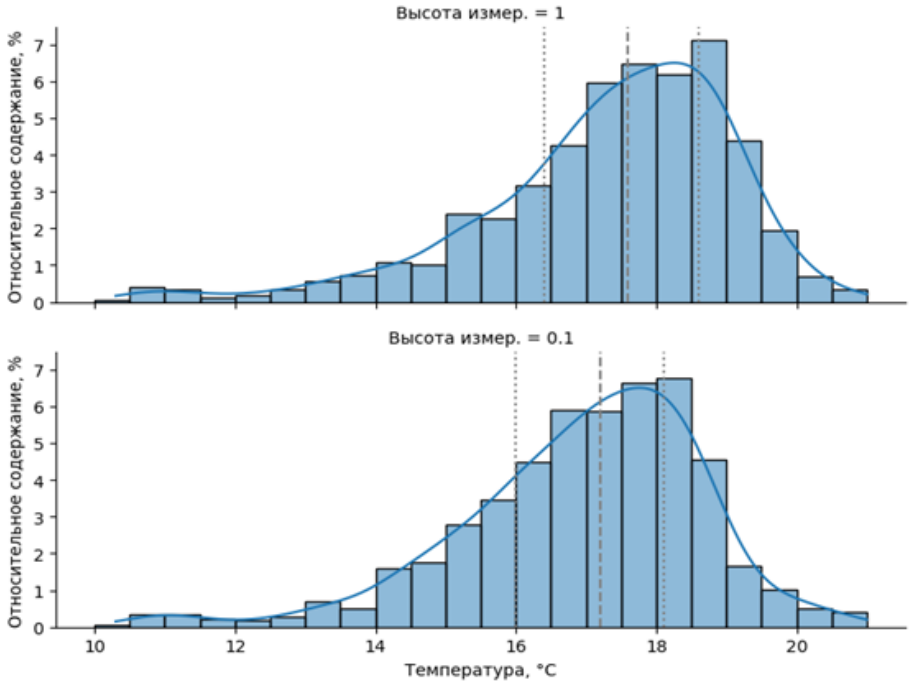



*Рисунок 4 – Гистограммы распределений температуры в кабинах при воздействии охлаждающего микроклимата*

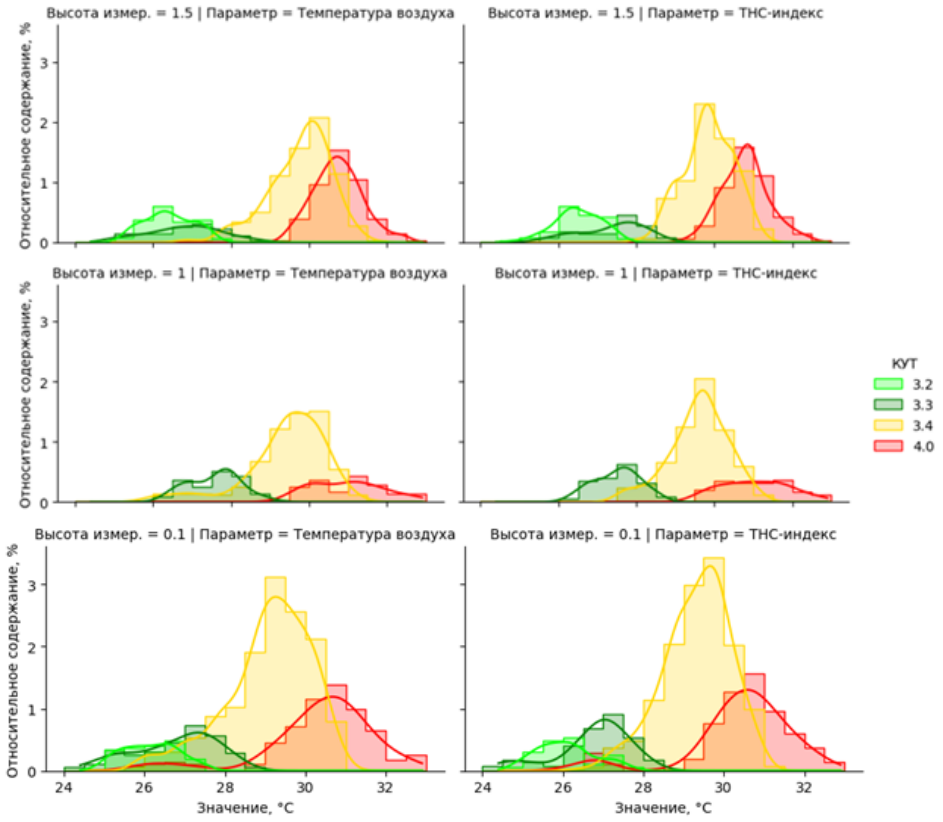



*Рисунок 5 – Распределения температуры и ТНС-индекса в кабинах с учётом КУТ в условиях нагревающего микроклимата*

*Таблица 1 – Описательная статистика распределения THC-индекса в кабинах с учётом КУТ в условиях нагревающего микроклимата*

| Класс 3.2 | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Высота, м | Мин. | Среднее | Медиана | Макс. | СКО | Асимметрия | Эксцесс |
| 0.1 | 24,8 | 26,075 | 26,05 | 27,6 | 0,709 | 0,354 | -0,597 |
| 1 | - | - | - | - | - | - | - |
| 1.5 | 24,9 | 26,5 | 26,5 | 27,6 | 0,586 | -0,299 | -0,168 |
| Класс 3.3 | | | | | | | |
| Высота, м | Min | Среднее | Медиана | Max | СКО | Асимметрия | Эксцесс |
| 0.1 | 24,4 | 26,757 | 27 | 28,4 | 0,927 | -0,976 | 0,537 |
| 1 | 26,3 | 27,5 | 27,6 | 28,6 | 0,584 | -0,158 | -0,698 |
| 1.5 | 25,5 | 27,367 | 27,5 | 28,7 | 0,825 | -0,561 | -0,661 |
| Класс 3.4 | | | | | | | |
| Высота, м | Min | Среднее | Медиана | Max | СКО | Асимметрия | Эксцесс |
| 0.1 | 26,3 | 29,32 | 29,4 | 31,2 | 0,846 | -0,556 | 0,244 |
| 1 | 27,5 | 29,607 | 29,7 | 31,2 | 0,75 | -0,467 | 0,222 |
| 1.5 | 28 | 29,85 | 29,9 | 31,3 | 0,641 | -0,188 | -0,422 |
| Класс 4 | | | | | | | |
| Высота, м | Min | Среднее | Медиана | Max | СКО | Асимметрия | Эксцесс |
| 0.1 | 25,9 | 30,429 | 30,6 | 32,8 | 1,295 | -1,468 | 2,842 |
| 1 | 29,6 | 31,05 | 31 | 32,9 | 0,856 | 0,138 | -0,834 |
| 1.5 | 29,3 | 30,79 | 30,8 | 32,5 | 0,602 | 0,241 | 0,189 |

*Таблица 2 – Описательная статистика распределения температуры в кабинах с учётом КУТ в условиях охлаждающего микроклимата*

| Класс 2 | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Высота, м | Min | Среднее | Медиана | Max | СКО | Асимметрия | Эксцесс |
| 0.1 | 19,1 | 20,05 | 19,95 | 20,9 | 0,472 | -0,034 | -0,303 |
| 1 | 19,1 | 20,05 | 20 | 21 | 0,472 | 0,198 | -0,379 |
| Класс 3.1 | | | | | | | |
| Высота, м | Min | Среднее | Медиана | Max | СКО | Асимметрия | Эксцесс |
| 0.1 | 15,8 | 17,907 | 17,9 | 19,7 | 0,723 | -0,21 | -0,284 |
| 1 | 16,1 | 18,255 | 18,4 | 20 | 0,789 | -0,409 | -0,213 |
| Класс 3.2 | | | | | | | |
| Высота, м | Min | Среднее | Медиана | Max | СКО | Асимметрия | Эксцесс |
| 0.1 | 14 | 16,042 | 16,1 | 18 | 0,811 | -0,172 | -0,595 |
| 1 | 14,1 | 16,589 | 16,65 | 19,4 | 1,019 | 0,143 | -0,16 |
| Класс 3.3 | | | | | | | |
| Высота, м | Min | Среднее | Медиана | Max | СКО | Асимметрия | Эксцесс |
| 0.1 | 13,1 | 14,233 | 14,2 | 15,5 | 0,601 | 0,253 | -0,398 |
| 1 | 13,1 | 14,233 | 14,2 | 15,4 | 0,609 | 0,077 | -0,905 |
| Класс 3.4 | | | | | | | |
| Высота, м | Min | Среднее | Медиана | Max | СКО | Асимметрия | Эксцесс |
| 0.1 | 10,3 | 11,9 | 11,65 | 13,4 | 1,014 | 0,124 | -1,501 |
| 1 | 10,4 | 11,9 | 11,9 | 13,7 | 1,018 | 0,105 | -1,376 |

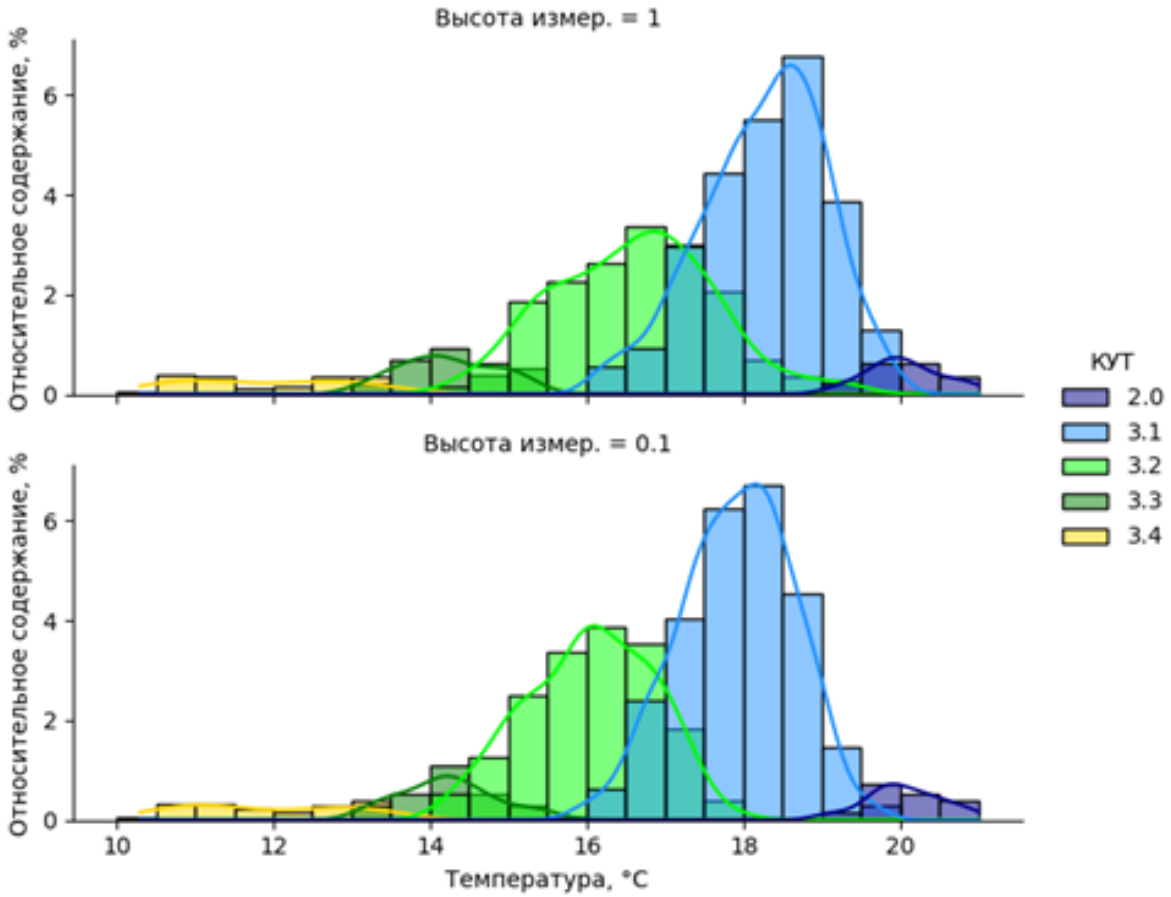



*Рисунок 6 – Распределение температуры в кабинах с учётом КУТ в условиях охлаждающего микроклимата*

**Обсуждение.** В статье представлен количественный подход к оценке как нагревающего, так и охлаждающего микроклимата кабин автомотрис на основании параметров рабочей среды предприятия. Его отличительной чертой является устранение проблемы субъективных суждений о частоте инцидентов и вероятности причинения вреда.

Результирующие распределения исследуемых параметров микроклимата, по сути, состоят из нескольких компонентов, каждый из которых близок к нормальному закону и представляет собой отдельно взятый КУТ.

При этом, их суммирование не приводит к появлению нормального распределения в силу непропорциональности вклада таких слагаемых. Такая тенденция наблюдается практически во всех рассмотренных ситуациях при наличии достаточного объёма данных.

Также микроклимат в кабинах путевых машин характеризуется градиентом температуры по высоте, рассчитываемым между различными парами точек измерения [11].

Кроме того, весьма информативен градиент THC-индекса, предложенный ранее в качестве критерия состояния условий труда при воздействии параметров микроклимата [1]. Для обеспечения допустимых условий труда на рабочих местах перепад температуры воздуха не должен превышать 3°C/м по высоте, а по горизонтали (как и в целом в течение смены) 4°C/м для категорий работ *Iа* и *Iб*; 5°C для категорий работ *IIа* и *IIб*.

Рассмотрим подробнее закономерности изменения величин градиентов температур и THC-индекса в кабине автомотрисы (рис. 7 и 8).

При воздействии нагревающего микроклимата санитарная норма в 3°C/м превышается только в опасных условиях труда.

В условиях же охлаждающего микроклимата этого не наблюдается по причине менее негативного воздействия на машиниста, что было отмечено ранее.

Очевидна следующая закономерность: в более вредных условиях труда машинистов градиенты температуры и THC-индекса чаще принимают более высокие значения.

Кроме того, можно утверждать о близости этих распределений к нормальному закону, с поправкой на величину массива исходных данных и погрешности измерений.

Таким образом, результаты исследования необходимы для разработки и валидации математических моделей тепломассопереноса в кабинах автомотрис и последующего проектирования систем нормализации микроклимата для путевых машин.

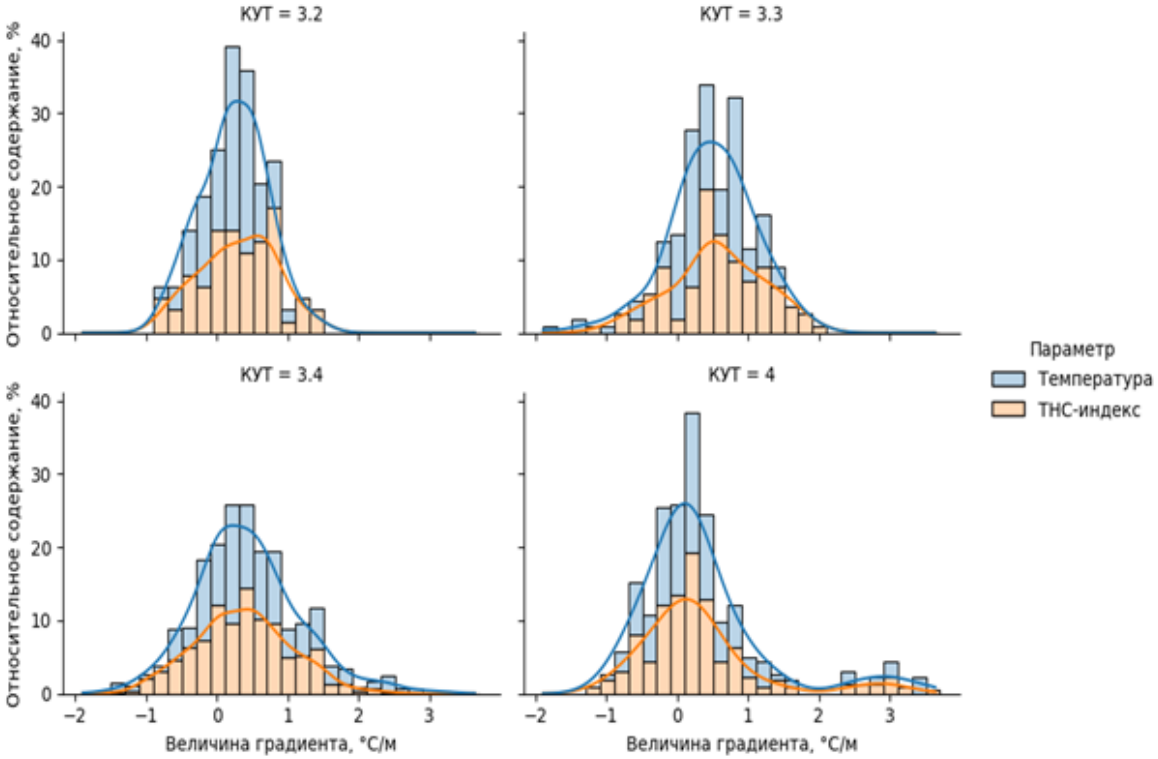



*Рисунок 7 – Градиенты температуры и ТНС-индекса в кабинах автомотрис в условиях нагревающего микроклимата*

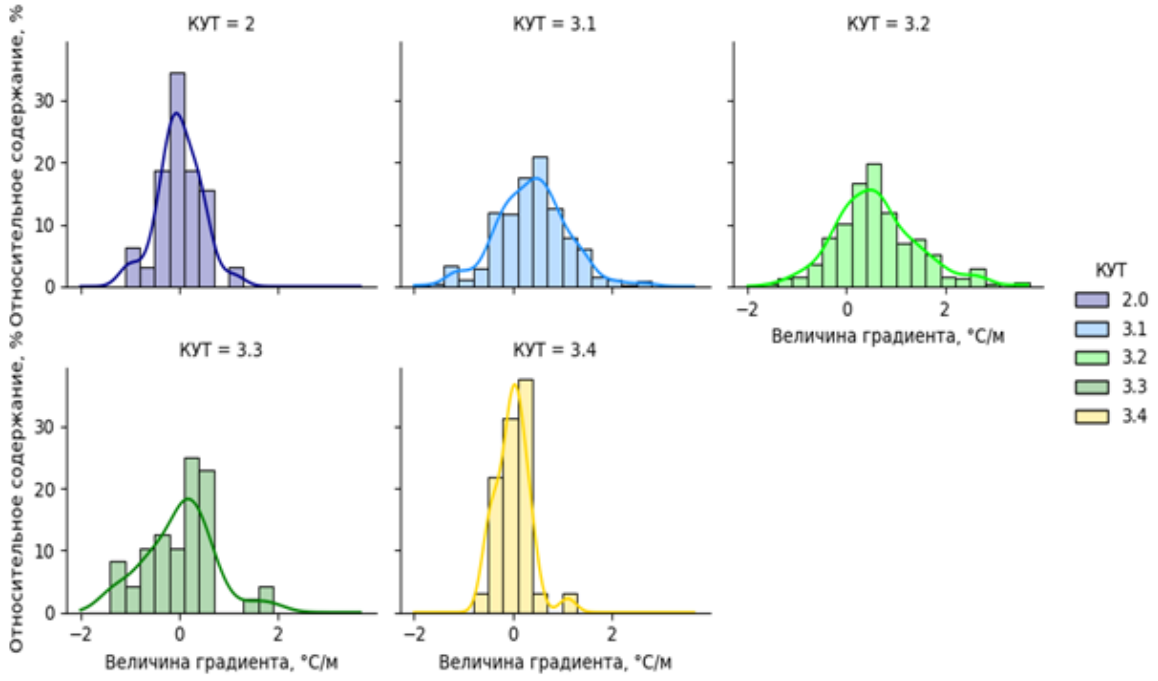



*Рисунок 8 – Градиенты температуры в кабинах автомотрис в условиях охлаждающего микроклимата*

**Выводы.** Машинист автомотрисы при работе в условиях нагревающего микроклимата подвергается значительно более негативному воздействию, чем при работе в охлаждающем.

Распределения температуры и ТНС-индекса при воздействии нагревающего микроклимата имеют два явно выраженных пика, один из которых является преобладающим, а другой становится заметен лишь при достаточном объёме данных. В случае охлаждающего микроклимата распределение становится одномодальным, т.е. один из пиков практически отсутствует и имеются лишь немногочисленные экстремальные значения.

Результирующие распределения исследуемых параметров микроклимата, по сути, состоят из нескольких компонентов, каждый из которых близок к

нормальному закону и представляет собой отдельно взятый КУТ. При этом, их суммирование не приводит к появлению нормального распределения.

В более вредных условиях труда градиенты температуры и ТНС-индекса чаще принимают более высокие значения. Однако, санитарная норма в 3°С/м превышается только в опасных условиях труда при воздействии нагревающего микроклимата.

Перспективным направлением дальнейших исследований является установление статистической связи параметров микроклимата в кабине от аналогичных факторов окружающей среды.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Масленский В.В. Выбор метода расчета теплопоступлений от солнечной радиации для определения нагрузки на климатическую систему кабины мобильной машины. Безопасность техногенных и природных систем. – 2021;(4):2-7. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2021-4-2-7.

2. Кузина Л.Г. Влияние инфильтрации воздуха на тепловой баланс кабин машиниста и пассажирских салонов подвижного состава железных дорог: дис. … канд. технич. наук: 05.26.01 / Л.Г. Кузина – М., 1996. – 168 с.

3. Давыдочкин, Ю.Н. Нормативное обеспечение в области микроклимата на железнодорожном подвижном составе / Ю.Н. Давыдочкин, Д.В. Емельянов, Л.В. Вербицкая // Локомотив. – 2022. – № 12(792). – С. 6-8. – EDN: QZOUFC.

4. Гмызин В.С. Вопросы улучшения микроклимата в кабине локомотива / В.С. Гмызин // Транспорт-2011: труды Всероссийской научно-практической конференции: в 3-х частях, Ростов-на-Дону, 01 апреля 2011 года / Министерство транспорта РФ, Федеральное агентство железнодорожного транспорта, Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН, Южный научный центр РАН, Российский национальный комитет по трибологии, Ростовский государственный университет путей сообщения, Российская академия транспорта; Редактор А.Н. Гуда. Том Часть 2. – Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2011. – С. 401-402. – EDN: URRUYO.

5. Гутор, Е.М. Факторы риска развития заболеваний у работников локомотивных бригад / Е.М. Гутор, Е.А. Жидкова, К.Г. Гуревич // Медицина труда и промышленная экология. – 2022. – Т. 61, № 1. – С. 43-52. – DOI 10.31089/1026-9428-2022-62-1-43-52. – EDN: WQOUWX.

6. Емельянов А.Л. Энергоэффективные транспортные системы кондиционирования воздуха: автореф. дис. … д-ра. технич. наук: 05.04.03 / А.Л. Емельянов – СПб., 2016. – 32 с.

7. Besik Meskhi, Yuri Bulygin, Ekaterina Shchekina, and Viktor Maslensky Elements of the normalization system of microclimate in the cabin of grain mandy combine TORUM // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – №.403. – С. 012089.doi:10.1088/1755-1315/403/1/012089.

8. Киле, К.М. Микроклимат в кабине машиниста тепловоза / К.М. Киле, Н.В. Муллер // Трансформация информационно-коммуникативной среды общества в условиях вызовов современности: Материалы II Международной научно-практической конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 30 ноября 2023 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2023. – С. 452-454. – EDN: VROYAK.

9. Колесников, С.Р. Усовершенствование систем жизнеобеспечения пассажирского подвижного состава: обзор патентов / С.Р. Колесников // Наука та прогрес транспорту. – 2018. – № 1(73). – С. 44-55. – DOI 10.15802/stp2018/123460. – EDN: UPSQZE.

10. Щербаков, Н.В. О возможности создания комфортного микроклимата в кабине транспортных средств / Н.В. Щербаков, М.С. Викторов, Н.Е. Курносов // Инновации технических решений в машиностроении и транспорте: Сборник статей VII Всероссийской научно-технической конференции для молодых ученых и студентов с международным участием, Пенза, 16-17 марта 2021 года. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2021. – С. 258-264. – EDN LUPPNL.

11. Евсеева О.С. О возможности создания устройства для обеспечения микроклимата в кабине транспортного средства / О.С. Евсеева // Инновации технических решений в машиностроении и транспорте: Сборник статей IV Всероссийской научно-технической конференции для молодых ученых и студентов с международным участием, Пенза, 14-15 марта 2018 года / Под общей редакцией В.В. Салмина. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2018. – С. 33-37. – EDN: XMJHRZ.

12. Баланов И.А., Булыгин Ю.И., Ашихмин Д.В., Гуменюк А.С., Финоченко Т.А. Статистический анализ параметров микроклимата в кабинах путевых машин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – В. 9. – С. 111-118. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-9-111-112.

13. Yuriy Bulygin, Viktor Maslensky, Ekaterina Shchekina, Denis Ashikhmin, Vadim Baranichenko, Aleksander Pavlikov. Finite element simulation for microclimate normalization at the crane operator workplace // ERSME-2023 // E3S Web of Conferences 376, 03024 (2023)

14. Лосавио Н.Г., Школьников Б.И., Галкина О.В. Метод исследования систем отопления кабин подвижного состава железнодорожного транспорта//Гигиена и санитария. – 1999. – №6. – С. 64.

15. Кудрин М.Ю. Способы повышения эффективности функционирования систем отопления и вентиляции пассажирских вагонов: дис. … канд. технич. наук: 05.22.07 / М.Ю. Кудрин – СПб., 2006. – 127 с.

16. Способ повышения точности расчетов математических тепловых моделей микроклимата в кабинах транспортных средств // Инженерно-техническое обеспечение АПК. Реферативный журнал. – 2002. – № 3. – С. 916. – EDN: ECOOBH.

17. Патент № 2799148 C1 Российская Федерация, МПК F24F 3/00. Система микроклимата и виброизоляции вагона восстановительного поезда: № 2022135279: заявл. 29.12.2022: опубл. 04.07.2023 / О.В. Денисов, В.В. Бараниченко, О.В. Яценко, Д.О. Денисов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Донской государственный технический университет". – EDN: DVPHNA.

18. Патент № 2489287 C2 Российская Федерация, МПК B61C 17/12. Система обеспечения микроклимата в кабине управления локомотива: № 2011119395/11: заявл. 07.11.2011: опубл. 10.08.2013 / Д.А. Газев, Е.М. Лыткина, А.М. Худоногов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Иркутский государственный университет путей сообщения (ФГБОУ ВПО ИрГУПС). – EDN: FNSRQS.

19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021614369 Российская Федерация. Программа ЭВМ для блока БККВ-5Б системы обеспечения микроклимата салона электропоезда ЭП2Д, ЭП3Д: № 2021613465: заявл. 16.03.2021: опубл. 24.03.2021 / Ю.В. Лютова. – EDN: QFOONK.

20. Патент № 2545227 C1 Российская Федерация, МПК E04B 1/84. Защитная кабина оператора: № 2013146638/03: заявл. 18.10.2013: опубл. 27.03.2015 / О.С. Кочетов, А.Ю. Тараканов; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение "Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России" (федеральный центр науки и высоких технологий). – EDN: JYUJPM.

*Статья поступила в редакцию 04.04.2024*
*Статья принята к публикации 17.06.2024*

УДК 004.413.04
EDN: AXEEOO

# СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ РИСКА НА ПРЕДПРИЯТИЯХ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА

© Автор(ы) 2024

SPIN: 7032-9137
AuthorID: 689966
ORCID: 0000-0002-4214-012X
**ХАЙРУЛЛИН Руслан Зуфарович**, кандидат биологических наук,
доцент кафедры «Промышленная безопасность»
*Казанский национальный исследовательский технологический университет*
*(420015, Россия, Республика Татарстан, Казань, улица Карла Маркса, 68, e-mail: KhayrullinRZ@corp.knrtu.ru)*
SPIN: 8546-0100
AuthorID: 838615
ORCID: 0000-0001-8434-7519
**ЗУБКОВА Аделина Дамировна**, кандидат химических наук,
доцент кафедры «Промышленная безопасность»
*Казанский национальный исследовательский технологический университет*
*(420015, Россия, Республика Татарстан, Казань, улица Карла Маркса, 68, e-mail: zubkovaad@mail.ru)*
SPIN: 2046-0869
AuthorID: 794752
ORCID: 0000-0003-0766-1189
**ТУЧКОВА Оксана Анатольевна**, кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Промышленная безопасность»
*Казанский национальный исследовательский технологический университет*
*(420015, Россия, Республика Татарстан, Казань, улица Карла Маркса, 68, e-mail: touchkova-o-a@mail.ru)*
SPIN: 9461-3222
AuthorID: 765369
ORCID: 0000-0002-0400-0986
**ХАЙРУЛЛИНА Ляйсан Исмагиловна**, кандидат социологических наук, доцент,
доцент кафедры «Промышленная безопасность»
*Казанский национальный исследовательский технологический университет*
*(420015, Россия, Республика Татарстан, Казань, улица Карла Маркса, 68, e-mail: lhda79@mail.ru)*

**Аннотация**. В статье рассмотрены различные подходы к оценке уровня риска на предприятиях нефтегазового комплекса. В статье сделан акцент на том, что риск нанесения травм различной степени тяжести работникам требует проведения качественной идентификации имеющихся на рабочих местах работников вредных и опасных производственных факторов. Более подробно описаны методы, которые предприятие может использовать при оценке риска здоровью персонала, в том числе и при оценке профессионального риска. В качестве примера были выбраны предприятия нефтегазового комплекса со схожей производственной деятельностью и наличием идентичных опасных и вредных факторов. С учетом имеющихся данных по выбранным предприятиям авторами проведен сравнительный анализ применяемых методов оценки профессиональных рисков, а также риска для здоровья работников. Показано, что выбранные для анализа предприятия при проведении оценки профессиональных рисков применяют самостоятельно разработанные стандарты. Авторами предлагается использовать для оценки риска здоровью работникам подходы, установленные ГОСТ Р 70675-2023, интегрировать их в уже действующие на рассматриваемых предприятиях системы менеджмента риска. Это позволит выработать единый подход к процедуре оценки рисков на предприятиях нефтегазовой отрасли с учетом оценки риска здоровью персонала, так как такие предприятия отличаются повышенным уровнем опасности. Руководителям и специалистам нефтегазовых предприятий такой подход позволит принимать более обоснованные и качественные решения по управлению рисками.

**Ключевые слова**: нефтегазовое предприятие, профессиональный риск, безопасность труда, экологический риск, производственный риск, авария, опасный производственный объект, оценка риска, методы, система управления.

# COMPARATIVE ANALYSIS OF APPROACHES TO RISK ASSESSMENT AT OIL AND GAS ENTERPRISES

© The Author(s) 2024

**KHAIRULLIN Ruslan Zufarovich**, candidate of biological sciences,
associate professor of the «Industrial Safety» department
*Kazan National Research Technological University*

*(420015, Russia, Kazan, Karl Marks str., 68, e-mail: KhayrullinRZ@corp.knrtu.ru)*
**ZUBKOVA Adelina Damirovna**, candidate of chemical sciences,
associate professor of the department of «Industrial Safety»
*Kazan National Research Technological University*
*(420015, Russia, Republic of Tatarstan, Kazan, street Karl Marx, 68, e-mail: zubkovaad@mail.ru)*
**TUCHKOVA Oksana Anatolievna**, candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the department of «Industrial Safety»
*Kazan National Research Technological University*
*(420015, Russia, Kazan, Karl Marks str., 68, e-mail: touchkova-o-a@mail.ru)*
**KHAIRULLINA Liaisan Ismagilovna**, candidate of sociological sciences, associate professor,
associate professor of the department of «Industrial Safety»
*Kazan National Research Technological University*
*(420015, Russia, Republic of Tatarstan, Kazan, street Karl Marx, 68, e-mail: lhda79@mail.ru)*

**Abstract**. The article discusses various approaches to assessing the level of risk at oil and gas enterprises. The article focuses on the fact that the risk of causing injuries of varying severity to workers requires a qualitative identification of the harmful and dangerous production factors present in the workplace. The methods that an enterprise can use when assessing the health risk to personnel, including when assessing occupational risk, are described in more detail. As an example, enterprises of the oil and gas complex with similar production activities and the presence of identical hazardous and harmful factors were selected. Taking into account the available data on selected enterprises, the authors conducted a comparative analysis of the methods used to assess occupational risks, as well as the risk to the health of workers. It is shown that the enterprises selected for analysis apply independently developed standards when assessing occupational risks. The authors propose to use the approaches established by GOST R 70675-2023 to assess the health risk to workers and integrate them into the risk management systems already in place at the enterprises under consideration. This will make it possible to develop a unified approach to the risk assessment procedure at oil and gas industry enterprises, taking into account the assessment of the risk to personnel health, since such enterprises are characterized by an increased level of danger. This approach will allow managers and specialists of oil and gas enterprises to make more informed and high-quality decisions on risk management.

**Keywords**: oil and gas enterprise, occupational risk, labor safety, environmental risk, production risk, accident, hazardous production facility, risk assessment, methods, management system.

***Для цитирования:*** *Хайруллин Р.З. Сравнительный анализ подходов к оценке риска на предприятиях нефтегазового комплекса / Р.З. Хайруллин, А.Д. Зубкова, О.А. Тучкова, Л.И. Хайруллина // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 2(66). – С. 141-149. – EDN: AXEEOO.*

**Введение.** Нефтегазовый комплекс является одним из ключевых отраслей государства, так как обеспечивает энергетическую безопасность и его экономический рост. Однако работа этой отрасли сопряжена с различными видами рисков: технологическими, экологическими, финансовыми и другими. В настоящее время, как отмечается многими исследователями (Н. В. Муллер [1], Д. В. Мун [2], Г.Н. Медведева [3], [4-15] и др.), все более актуальной становится задача точного нахождения и определения на рабочих местах вредных и опасных производственных факторов, а также проведение всесторонней комплексной оценки имеющихся рисков с целью снижения аварийности на предприятиях, эксплуатирующих опасные производственные объекты, большинство из которых относится именно к нефтегазовому комплексу.

На предприятиях нефтегазового комплекса процедура оценки риска играет ключевую роль в обеспечении безопасности и предотвращении чрезвычайных ситуаций. На сегодняшний день существует два основных подхода к оценке рисков, которые могут применяться на таких предприятиях: количественный и качественный. Первый основан на математических моделях и статистических данных. Он позволяет количественно оценить вероятность возникновения опасных ситуаций и их последствия. С помощью такого подхода можно получить числовые значения рисков, более объективную их оценку и сравнительный анализ различных сценариев и мероприятий по снижению риска. Однако он требует большого объема данных, специальных знаний для проведения расчетов, может быть сложным в применении на практике. Поэтому все чаще предприятиями нефтегазового комплекса применяется качественная оценка опасностей и их последствий. Такая оценка предполагает использование категорий, шкал, относительных характеристик для оценки рисков. Этот подход более прост в применении, не требует большого объема данных, позволяет быстро оценить общую картину риска, может быть эффективным для начальной оценки риска или в условиях ограниченной информации. Однако во всех случаях управление рисками требует комплексного подхода, предполагающего разработку стратегии управления рисками, их постоянный мониторинг и анализ, а также использование специализированных инструментов и технологий.

На сегодняшний день наиболее эффективным направлением повышения безопасности рабочих

мест сотрудников любого предприятия, с точки зрения риск-ориентированного подхода, является минимизация вероятности отклонений технологических параметров процесса от проектных значений. В большинстве случаев такие отклонения могут привести к возникновению аварийных ситуаций с разрушением объектов производства, что в свою очередь влечет за собой риск нанесения травм различной степени тяжести [16]. Поэтому для повышения эффективности таких мероприятий необходимо проведение качественной идентификации имеющихся на рабочих местах сотрудников вредных и опасных производственных факторов.

Анализ информации из открытых источников о техническом состоянии основных фондов предприятий нефтегазовой отрасли, под которыми понимаются производственные здания, основное оборудование, машины и транспортные средства, показал, что они в значительной мере определяют условия труда работников, а также оказывают влияние на их работоспособность, здоровье и безопасность. Необходимо отметить, что большинство действующих предприятий нефтегазового комплекса были спроектированы и построены несколько десятилетий назад по действующим в то время нормам безопасности, которые не всегда отвечают современным требованиям к обеспечению безопасности ведения технологического процесса. Это способствует росту числа аварий, причиной которых является прежде всего физический износ основных фондов. По официальным статистическим данным за три года с 2019 по 2021 год на предприятиях нефтегазовой промышленности произошло 32 случая выброса горючих веществ из оборудования с последующим возгоранием, 18 случаев полного разрушения сооружений, в результате которых погибло 30 работников предприятий, 112 человек получили травмы различной степени тяжести [16].

По данным Ростехнадзора с января по сентябрь 2023 года на поднадзорных ему опасных производственных объектах было зарегистрировано 67 аварий, в том числе 16 аварий, сопровождавшихся несчастными случаями с летальным исходом [17].

Необходимо отметить тот факт, что в большинстве случаев основной причиной, приводящей к травмам различной степени тяжести является нарушение действующих требований безопасного ведения технологического процесса, с которыми работники были ознакомлены перед началом работ. Снижение влияния данных факторов на обеспечение безопасности производства в формирующейся парадигме безопасности может быть достигнуто прежде всего соблюдением работниками всех действующих правил, касающихся безопасности при проведении опасных работ, путем как контрольных, так и мотивирующих процедур, а также своевременным определением вредных и опасных производственных факторов на рабочих местах, принятие мер по их сокращению, которые будут способствовать безопасному ведению работ.

С точки зрения повышения безопасности производства, наиболее важными являются именно процедуры идентификации опасностей и мероприятия по снижению рисков.

В нефтегазовой отрасли можно выделить следующие виды рисков, которые в той или иной мере могут оказать влияние на здоровье персонала (рис. 1).

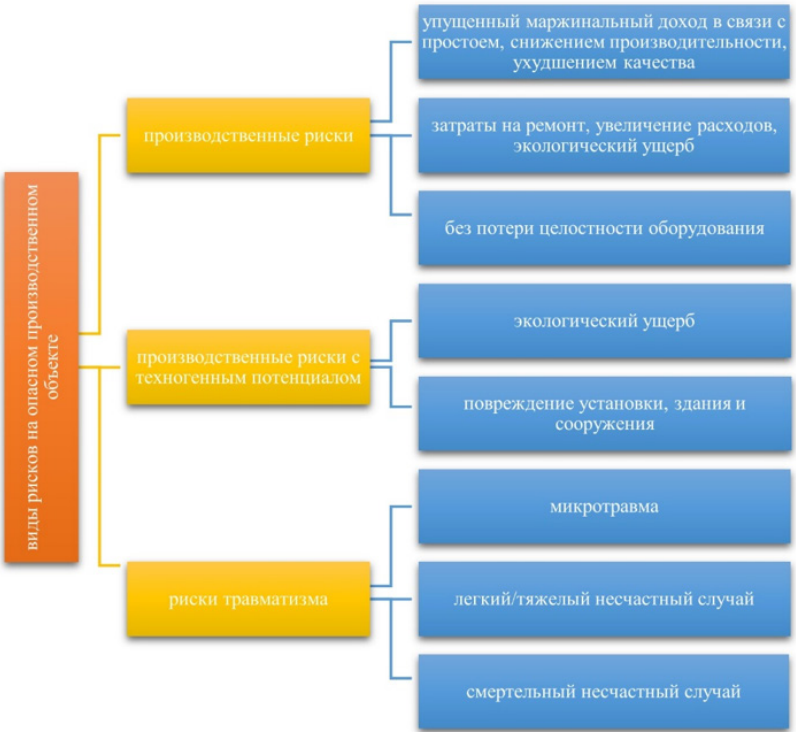



*Рисунок 1 – Классификация производственных рисков*

Вредные и опасные производственные факторы могут оказывать негативное влияние на работников как при текущем режиме работы предприятия, так и в случае возникновения различных аварийных ситуаций. Ежегодно в мире большое количество работников получают травмы различной степени тяжести, вплоть до летального исхода, а также приобретают профессиональные заболевания на своих рабочих местах из-за недостаточно эффективной системы идентификации вредных и опасных производственных факторов и неточной оценки уровня имеющихся на их рабочих местах рисков [18].

Именно поэтому представляется целесообразным, учитывая имеющийся на ряде предприятий нефтегазовой отрасли опыт, разработать единые общие критерии оценки риска здоровью персонала на данных предприятиях. Такой подход в дальнейшем позволил бы провести адаптацию разработанных методик к специфике деятельности каждого предприятия путем разработки, дополнения и принятия соответствующих стандартов организации и локальных нормативных актов.

Согласно современным представлениям, «профессиональный риск» – это вероятность причинения вреда жизни или здоровью работника в результате воздействия на него вредного или опасного производственного фактора при выполнении им своей трудовой функции с учетом возможной тяжести повреждения здоровья. Под понятием «риск для здоровья» понимается потенциальное негативное последствие на здоровье работника, которое возникает в результате действия одного или нескольких факторов риска [19].

Необходимо также отметить, что процедуры управления рисками для здоровья работников могут быть интегрированы в существующую систему рисков предприятия наряду с производственными рисками и рисками травматизма, находящимися в фокусе внимания опасного производственного объекта. При этом подходы современного риск-ориентированного подхода к оценке вредных и опасных производственных факторов могут быть успешно использованы и при оценке вероятности возникновения различных неблагоприятных событий и их влияния на достижение основных целей предприятий нефтегазового комплекса. Риск-менеджмент для здоровья работников может учитывать как индивидуальные, так и коллективные риски, что также не противоречит общим подходам в теории риска.

В настоящее время для процедуры оценки риска наибольшее применение находят следующие методы:

а) визуальный метод, при котором проводят осмотр рабочего места сотрудника, позволяющий осуществить первичную идентификацию вредных и опасных производственных факторов, установить наличие ситуационных рисков и риски воздействия, а также проводится субъективная интуитивная оценка степени риска;

б) ситуационный метод, когда анализируются возможные сценарии развития аварийных ситуаций, возможное воздействие опасностей на организм работающего на различных стадиях выполнения работ;

в) документально-аналитический метод, при котором изучается имеющаяся информация о вероятности возникновения опасной ситуации и степени тяжести последствий для работающего.

Предприятие, проводящее оценку риска, может использовать различные современные технологии определения наличия вредных и опасных факторов на рабочем месте, а также обращаться в специализированные организации, обладающие необходимыми компетенциями и оборудованием для проведения необходимых работ.

Оценка рисков может проводиться по различным методикам. На рисунке 2 представлены различные подходы к оценке уровня риска на предприятии [20].

Процедура объединения идентифицированных на рабочих местах работника рисков, а также построение модели интегрального риска, под которым понимается суммарная характеристика обнаруженных опасных и вредных факторов может быть проведена как с использованием качественных, полуколичественных и количественных методик, так и с использованием специализированных программных комплексов, позволяющих существенно ускорить и автоматизировать данную процедуру.




*Рисунок 2 – Различные методы оценки рисков [20]*

Чаще всего предприятия используют матричный метод, проверочный лист, а также диаграмму «Галстук-бабочка», так как они достаточно просты и позволяют получать наглядные результаты анализа. Необходимо отметить, что в ряде случаев использование традиционных методик оценки риска в рамках конкретного предприятия может привести к отличающимся результатам, имеющим малую сходимость. В этом случае рекомендуется использовать один из методов оценки рисков, наиболее адекватно описывающий рассматриваемую ситуацию и соответствующий поставленным целям. Предприятие также может адаптировать методику оценки риска, переработав ее с учетом особенностей ведения технологического процесса на предприятии, при этом данная методика должна быть обязательно утверждена локальным нормативным актом [21].

**Методология.** Целью исследования является проведение сравнительной оценки активно используемых в настоящее время для процедуры оценки риска подходов ведущих предприятий нефтегазовой отрасли и требований национального стандарта ГОСТ Р 70675-2023, а также выявить роль термина «риск для здоровья» в данных нормативных документах.

**Результаты.** Для повышения безопасности требуется прежде всего определить имеющиеся на рабочем месте сотрудника опасные и вредных производственные факторов, то есть провести идентификацию опасностей. Только после этого можно начинать процедуру оценки риска для количественной оценки обнаруженных опасностей. В настоящее существуют два направления анализа безопасности – априорный и апостериорный анализ, каждый из которых обладает своими достоинствами и недостатками, а также имеет свои методические подходы и приемы, которые могут быть применимы и эффективны в том или ином случае [22].

Априорный (предварительный) риск – это риск для здоровья, который определяется в ходе качественной и количественной процедуры оценки риска, основанной на гигиенически-нормируемых воздействиях, выявленных до момента неблагоприятного воздействия их на здоровье работника, в случае реализации негативного сценария. Апостериорный (окончательный) риск для здоровья может быть выявлен при прохождении медицинских мероприятий (например, наличие у работника профессиональных или профессионально-обусловленных заболеваний) [19].

Эффективно функционирующая система управления профессиональными рисками на предприятии может быть успешно реализована только в случае реализации на постоянной основе целого ряда мероприятий, которые направлены на обеспечение безопасности труда и снижение профессиональных рисков (рис. 3) [20].

Для сравнения имеющихся подходов к процедуре оценки риска в качестве объектов исследования были выбраны крупнейшие предприятия (ПАО «Газпром», ООО «Иркутская нефтяная компания» и АО «Газпром газораспределение»).

Данные организации являются достаточно крупными компаниями нефтегазовой отрасли, поэтому большинство опасных и вредных производственных факторов у них идентичны.

При проведении процедуры оценки рисков, ПАО «Газпром», АО «Газпром газораспределение» применяют самостоятельно разработанные стандарты организации СТО [21, 23-25], а ООО «Иркутская нефтяная компания» использует РГ.01.10 [25].

При проведении процедуры идентификации опасностей во всех компаниях последовательно рассматриваются следующие характеристики (рис. 4).




*Рисунок 3 – Этапы внедрения системы управления профессиональными рисками [20]*

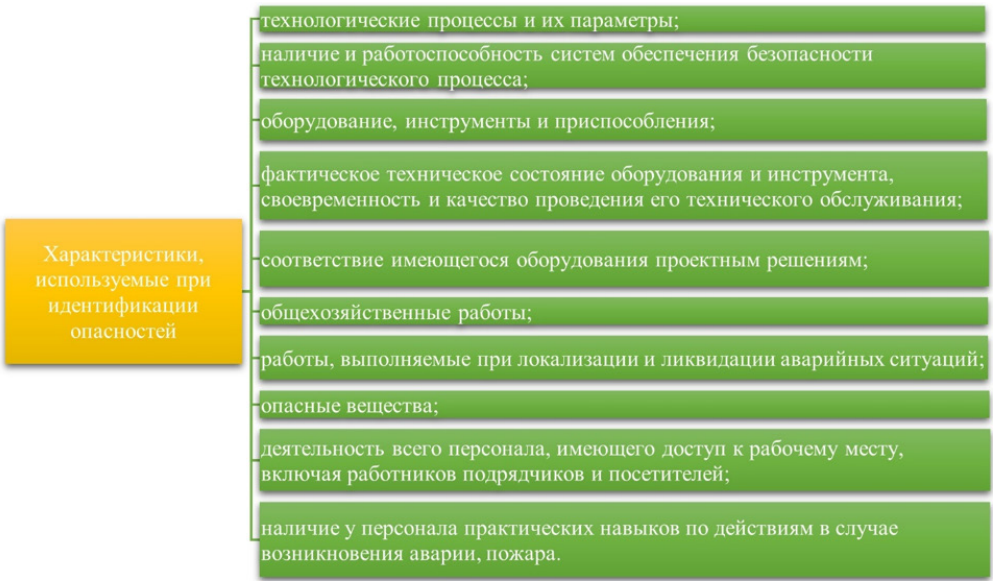



*Рисунок 4 – Основные характеристики, необходимые для идентификации опасностей [20]*

Согласно принятым в ПАО «Газпром» требованиям для процедуры определения и оценки уровня опасностей создается так называемая рабочая группа, состоящая из специалистов, владеющих необходимыми знаниями в данной области. Члены данной группы совместно рассматривают каждое идентифицированное опасное событие, а затем принимают совместное решение о значении риска, пользуясь матрицей оценки рисков [24]. В данном случае риск для здоровья работников оценивается косвенно через различные виды рисков. Оценку вероятности реализации риска проводят с учетом уже существующих мер управления рисками, которые основаны на прошлом опыте наличия различных аварий и инцидентов за последние 10 лет с учетом накопленных структурами ПАО «Газпром» статистических данных. Оценка вероятности реализации риска проводится по пятибалльной шкале, где за «1» принимается минимальная величина вероятности, а за «5» – максимальная величина [24].

При ранжировании для каждого идентифицированного риска устанавливается его относительный ранг и определяется значимость уровня риска. Риски по значимости их уровня подразделяются на критические I уровня, критические II уровня, существенные, малосущественные и несущественные. Критические и существенные риски образуют группу ключевых рисков (рис. 5).

В АО «Газпром газораспределение» оценка риска проводится рабочей группой в области охраны труда и промышленной безопасности и непосредственно отражает риск здоровью работника через показатель тяжести последствий. При этом рассматриваются опасные события, которые имели место в организации на аналогичных рабочих местах за последние 5 лет. Принятая в данной организации форма матрицы определения уровня риска представлена на рисунке 6 [23].

Уровень риска в ООО «Иркутская нефтяная компания» определяется экспертным путем, тяжесть возможного вреда устанавливается по пятибалльной шкале и соотносится с четырьмя категориями последствий возможного сценария (по отношению к персоналу, к объектам, экологии, репутации). Риск для «персонала» непосредственно характеризует оценивание риска здоровью работника.

Для оценки риска в ООО «Иркутская нефтяная компания» применяется разработанная матрица оценки рисков в основе которой лежат статистические данные по произошедшим событиям (рис. 7). Сведения относительно периода выборки отсутствуют.

| Наименование значимости уровня риска | Значимость уровня риска в области охраны труда и промышленной безопасности | Значимость уровня риска в области пожарной безопасности | Относительный ранг риска (цвет) | Наименование значимости уровня риска |
|---|---|---|---|---|
| | Относительный ранг риска (балл) | | | |
| Критический I уровня | 9-10 | 9-10 | | Критический |
| Критический II уровня | 8 | 7-8 | | |
| Существенный | 5-7 | 4-6 | | Существенный |
| Малосущественный | 4 | 3 | | Несущественный |
| Несущественный | 2-3 | 2 | | |

*Рисунок 5 – Оценка значимости уровня риска в ПАО «Газпром» [24]*

| Тяжесть | | Описание тяжести последствий | Вероятность за последние 5 лет | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | A | B | C | D | E |
| | | | Событие не имело место в Компании | Событие имело место в Компании 1 раз | Событие имело место 1 раз в ГРО или более одного раза в Компании | Событие имело место 1 раз в филиале или более 1 раза в ГРО | Событие имело место более 1 раза в филиале |
| | 1 | Травмы или обратимое ухудшение здоровья с потерей трудоспособности до 15 дней | | | | | |
| | 2 | Тяжелая травма или ухудшение здоровья с потерей трудоспособности более 15 дней | | | | | |
| | 3 | От 1 до 3 случаев постоянной полной нетрудоспособности или несчастных случаев на производстве с летальным исходом | | | | | |
| | 4 | Более чем 3 летальных исхода в результате травмирования или профессионального заболевания | | | | | |

*Рисунок 6 – Матрица определения уровня риска в АО «Газпром газораспределение» [23]*

| Тяжесть | Последствия | | | | Вероятность | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | A | B | C | D | E |
| | Персонал (P) | Объекты (A) | Экология (E) | Репутация (R) | Неизвестно в отрасли | Известно в Отрасли | Известно в Компании | Случалось на данном Объекте | Случалась на данном объекте/подразделении чаще 1 раза в год |
| 5 | Критическое воздействие | Масштабный ущерб | Масштабное воздействие | Масштабное воздействие | II | II | I | I | I |
| 4 | Серьезное воздействие | Серьезный ущерб | Серьезное воздействие | Серьезное воздействие | III | II | II | I | I |
| 3 | Умеренное воздействие | Умеренный ущерб | Умеренное воздействие | Умеренное воздействие | III | III | II | II | I |
| 2 | Малое воздействие | Малый ущерб | Малое воздействие | Малое воздействие | IV | III | III | II | II |
| 1 | Незначительное воздействие | Незначительный ущерб | Незначительное Воздействие | Незначительное Воздействие | IV | IV | III | III | III |
| 0 | Воздействия нет | Ущерба нет | Воздействия нет | Воздействия нет | | | | | |

| | Категории риска |
|---|---|
| | Критический: I |
| | Высокий: II |
| | Средний: III |
| | Низкий: IV |

*Рисунок 7 – Матрица определения уровня риска в ООО «Иркутская нефтяная компания» [25]*

Таким образом можно сделать вывод о том, что несмотря на то, что данные методики оценки риска достаточно похожи, в то же время они имеют и существенные различия, например, в выборе временного периода вероятности реализации риска. Так в требованиях ПАО «Газпром» это 10 лет, в АО «Газпром газораспределение» – 5 лет, а в требованиях ООО «Иркутская нефтяная компания» данный срок не установлен, что затрудняет выработку единого подхода к использованию данных методик для предприятий нефтегазового комплекса, не входящих в структуру рассматриваемых компаний.

Данных недостатков лишен ГОСТ Р 70675-2023 [19]. В данном стандарте представлены единые подходы к оценке риска для здоровья работников для предприятий различных отраслей промышленности (рис. 8).

Предприятие, которое планирует использовать систему менеджмента риска с учетом риска для здоровья работников, разработанную на основе данного стандарта сможет реализовать современный эффективный системный подход к оценке и управлению основными производственными и внепроизводственными рисками, способных оказать влияние на здоровье персонала. Согласно требованиям ГОСТ Р 70675-2023 для формирования реестра рисков рабочая группа по управлению рисками для здоровья работников должна самостоятельно определить критерии допустимого риска, в случае если они не предусмотрены нормативными требованиями. Рабочей группой для качественного определения данных критериев могут быть сформулированы вопросы по степени тяжести последствий и частоте потенциальных инцидентов на предприятии, на котором планируется введение данной системы. Далее предприятие вправе самостоятельно определять критерии, а также степень допустимости каждого риска на их пересечении [19]. Несомненным

преимуществом данного стандарта по сравнению с уже рассмотренными локальными нормативными документами предприятий является единая система ранжирования рисков с учетом здоровья персонала, что позволяет провести сравнительный анализ уровня риска на нескольких предприятиях нефтегазового комплекса, имеющих аналогичные рабочие места с одинаковым набором вредных и опасных производственных факторов с помощью единых критериев.

| Общий балл | Значение риска |
|---|---|
| 0 | Нет |
| 1–4 | Низкий |
| 5–8 | Умеренный |
| 9–12 | Средний |
| 13–16 | Высокий |
| 17–20 | Критичный |

*Рисунок 8 – Ранжирование рисков на предприятии по ГОСТ Р 70675-2023 [19]*

**Обсуждение.** В результате проведенного сравнительного анализа подходов к оценке рисков на ряде нефтегазовых предприятий можно сделать вывод о том, что они достаточно схожи. Все рассматриваемые предприятия используют матричный метод [25]. Стоит отметить некоторые отличия в наименованиях значимости уровня риска с учетом его влияния на здоровье персонала в ранее принятых нормативных актах организаций и приведенных в ГОСТ Р 70675-2023 [19]. В целом уровень риска всеми оценивается как «критичный», «высокий», «средний» и «низкий». Однако в ПАО «Газпром» наименования значимости рисков отличаются от используемых в других организациях, что можно объяснить тем, что данная организация одной из первых в нашей стране стала активно внедрять риск-ориентированный подход и применять термины, которые традиционно использует в своей системе менеджмента риска. Например, при значениях уровня риска выше 8 баллов риск отмечается как «критический» и требует корректирующих мер, направленных на его снижение.

Также хотелось бы отметить, что в методике оценки уровня риска, используемой ООО «Иркутская нефтяная компания», последствия возможных аварийных ситуаций ранжируются по четырем категориям, причем категория «репутация» четко выделяется только в этой компании.

**Выводы.** В результате проведенного анализа имеющихся подходов к проведению процедуры оценки рисков можно сделать вывод о том, что в основе методов оценки риска рассмотренных компаний лежат идентичные подходы, однако имеются и некоторые различия, обусловленные, вероятно, субъективными представлениями авторов методик, сложившимися традициями в терминологии, а также общих подходах к оценке риска, действующими на данных предприятиях.

Требования и подходы к риск-менеджменту в области безопасности труда и охраны здоровья работников, которые установил ГОСТ Р 70675-2023, могут быть успешно интегрированы в действующие на рассматриваемых предприятиях системы менеджмента риска. Такая интеграция позволит модернизировать и выработать единый подход к процедуре оценки рисков на предприятиях нефтегазовой отрасли, отличающейся повышенным уровнем опасности и наличием вредных и опасных производственных факторов, не свойственных для предприятий других отраслей промышленности. А это, в свою очередь, позволит создать эффективно действующую систему управления рисками на предприятии, включающую процедуру минимизации и управления рисками не только в области производственной безопасности, но и иными рисками, которые являются значимыми для предприятия.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Муллер Н.В., Младова Т.А. Анализ условий труда и оценка профессиональных рисков при электрогазосварочных работах на нефтеперерабатывающем предприятии // Вестник НЦБЖД. – 2022. – № 1(51). – С. 163-171.

2. Мун Д.В., Попета В.В. Снижение рисков «человеческого фактора» через внедрение риск-культуры и риск-ориентированного мышления в организациях // Сборник трудов секции № 19 XXX Международной научно-практической конференции «Безопасность общества и вызовы времени: проблемы, события, судьбы» // Химки: Академия гражданской защиты МЧС России. – 2020. – С. 43-51.

3. Медведева Г.Н., Завьялов А.М. Оценка профессионального риска от воздействия на работников вредных и опасных факторов производственной среды // Проблемы безопасности российского общества. – 2020. – № 2(30). – С. 62-66.

4. Исмагилова Р.С., Вдовина И.В. Анализ методов оценки профессиональных рисков, применяемых в отраслях с высоким воздействием вредных и (или) опасных производственных факторов // Молодежный вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2023. – № 1(27). – С. 109-115.

5. Гутор Е.М., Жидкова Е.А., Гуревич К.Г. Некоторые подходы и критерии оценки риска развития профессиональных заболеваний // Медицина труда и промышленная экология. – 2023. – Т. 63. – № 2. – С. 94-101. DOI: 10.31089/1026-9428-2023-63-2-94-101.

6. Lyskova I.E. Management Commitment to the Goals of Production Safety as a Formation Factor of Integrated Safety of Industrial Enterprise Management System // Global Nuclear Safety. – 2021. – №4 (41). – P. 73- 91.

7. Panyukov D.I., Kozlovskii V.N., Aidarov D.V. et al. Risk Assessment and Risk Management // Russ. Engin. Res. 2023. – № 43. – P. 1011-1013. DOI: 10.3103/S1068798X23080208.

8. Santos-Olmo A., Sánchez L.E., Rosado D.G. et al. Towards an integrated risk analysis security framework according to a sys-

tematic analysis of existing proposals // Front. Comput. Sci. 2024. – №18. – P. 183808 DOI: 10.1007/s11704-023-1582-6.

9. Abdelmalek M., Guedes Soares C. Review of Risk Analysis Studies in the Maritime LNG Sector. // J. Marine. Sci. Appl. 2023. – №22. – P. 693-715. DOI: 10.1007/s11804-023-00376-0.

10. Panyukov D.I., Kozlovskii V.N., Aidarov D.V. et al. Effectiveness of FMEA Risk Analysis // Russ. Engin. Res. 2022. – №42. – P.1070-1072. DOI:10.3103/S1068798X22100203.

11. Charkhakan M.H., Heravi G.A New Approach to Risk Analysis: Probability–Impact–Manageability Assessment based on Chain of Risks // Iran J Sci Technol Trans Civ Eng 2023. – №47. – P.1211-1231. DOI: 10.1007/s40996-023-01057-2.

12. George C. The Essence of Risk Identification in Project Risk Management: An Overview // International Journal of Science and Research. – 2020. – №9. – P.1553-1557. DOI:10.21275/SR20215023033.

13. Maryam ST., Robiansyah A., Jao R. et al. // Evolution of risk management. Journal of Critical Reviews. 2020. – №1. – P.285-286. DOI: 10.31838/jcr.07.01.52.

14. Panyukov D.I., Kozlovskii V.N., Aidarov D.V. and Shakurskii M.V. FMEA risk analysis on the basis of action priorities // Russ. Eng. Res. 2022. – V. 42. – P.1077-1080. DOI:10.3103/S1068798X22100227.

15. Isah M.A., Kim BS. Development of Knowledge Graph Based on Risk Register to Support Risk Management of Construction Projects // KSCE J Civ Eng. 2023. – №27. – P.2733-2744. DOI: 10.1007/s12205-023-2886-7.

16. Полякова С.А., Ильичёв С.С. Анализ аварийности на объектах нефтегазовой отрасли России // Молодой учёный. – 2022. – №16. – С. 115-117.

17. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15 декабря 2023 г. № 457 "Об утверждении Программы профилактики рисков причинения вреда (ущерба) охраняемым законом ценностям при осуществлении федерального государственного надзора в области промышленной безопасности на 2024 год". URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_465083/2ff7a8c72de3994f30496a0ccbb1ddafdaddf518 (дата обращения 14.02.2024).

18. Изменение климата и внедрение передовых технологий порождает новые опасности на рабочих местах. URL: https://news.un.org/ru/story/2019/04/1353501 (дата обращения 14.02.2024).

19. ГОСТ Р 70675-2023 Руководство по оценке риска для здоровья работников. Введ. 01.05.2023. М.: Российский институт стандартизации. 2023. – 42 с.

20. Подберезина С.Г. Оценка профессиональных рисков: этапы, методы //Санэпидконтроль. Охрана труда. – 2020. – № 2. – С. 17- 37.

21. Исмагилова Р.С., Вдовина И.В. Анализ методов оценки профессиональных рисков, применяемых в отраслях с высоким воздействием вредных и (или) опасных производственных факторов // Молодежный Вестник УГАТУ. Естественные науки. – 2023. – № 1. – С. 109-115.

22. Априорный и апостериорный анализ безопасности систем. Примеры использования. URL: https://survincity.ru/2024/02/apriornyj-i-aposteriornyj-analiz-bezopasnosti (дата обращения 14.02.2024)

23. СТО Газпром газораспределение 8.6-1-2016. Единая система управления охраной труда и промышленной безопасностью в АО «Газпром газораспределение». Идентификация опасностей и управление рисками. Введ. 27.12.2016. СПб: 2016. 32 с.

24. СТО Газпром 18000.1-002-2020. Единая система управления производственной безопасностью. Идентификация опасностей и управление рисками в области производственной безопасности, Введ 30.01.2019. СПб: 2020. – 54 с.

25. РГ.01.10. Управление рисками в области безопасности труда и охраны здоровья. Введ. 26.06.2020. Иркутск: 2020. – 49 с.

26. ГОСТ Р 58969-2020. Управление технико-производственными рисками промышленного предприятия. Введ 01.08.2021. М.: Стандартинформ. – 2020. – 6 с.

*Статья поступила в редакцию 02.04.2024*
*Статья принята к публикации 17.06.2024*

УДК 614.8
EDN: BBWJNW

# О РЕЗУЛЬТАТАХ АНАЛИЗА НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКОГО АППАРАТА В ОБЛАСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАЩИТЫ СПАСАТЕЛЕЙ

© Автор(ы) 2024

SPIN: 5470-1533
AuthorID: 888327
ORCID: 0000-0002-4037-1231
ResearcherID: O-9318-2017
ScopusID: 56979008100

**РЫБАКОВ Анатолий Валерьевич,** доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры высшей математики
*Академия гражданской защиты МЧС России*
*(141435, Россия, Московская обл., г. о. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А,*
*e-mail: a.rybakov@agz.50.mchs.gov.ru)*

SPIN: 2498-4885
AuthorID: 858684

**ПЕТРЕНКО Павел Павлович,** адъюнкт научно-исследовательского центра
*Академия гражданской защиты МЧС России*
*(141435, Россия, Московская обл., г. о. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А,*
*e-mail: p.petrenko@agz.50.mchs.gov.ru)*

SPIN: 5470-1533
AuthorID: 888327
ORCID: 0000-0002-9093-1559
ScopusID: 57209274032

**ИВАНОВ Евгений Вячеславович,** кандидат технических наук,
доцент кафедры аварийно-спасательных работ командно-инженерного факультета
*Академия гражданской защиты МЧС России*
*(141435, Россия, Московская обл., г. о. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А,*
*e-mail: e.ivanov@agz.50.mchs.gov.ru)*

SPIN: 9827-4285
AuthorID: 743752
ORCID: 0000-0003-1153-6567

**МЯСНИКОВ Денис Владимирович,** кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры аварийно-спасательных работ командно-инженерного факультета
*Академия гражданской защиты МЧС России*
*(141435, Россия, Московская обл., г. о. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А,*
*e-mail: myasnikovdenis@mail.ru)*

**Аннотация.** В статье рассматривается научно-методический аппарат в области обеспечения защиты личного состава спасательных формирований при проведении аварийно-спасательных работ. Проанализированы способы оценки риска профессиональной деятельности спасателей с учетом факторов, влияющих на их защиту при проведении аварийно-спасательных работ в условиях обрушений зданий и сооружений, выявлены проблемные вопросы и предложены решения. Происшествия, связанные с взрывами и разрушениями в зданиях и сооружениях производственного, жилого, социально-бытового, культурного, административного назначения, коммуникациях и инфраструктурно-значимых объектах, создают угрозу безопасности привлекаемых к ликвидации таких происшествий сил. Используемые в настоящее время модели оценки приемлемости профессионального риска не позволяют количественно выразить степень защиты спасателей непосредственно на участке работ в тех условиях, которые создались на месте ЧС и своевременно скорректировать план проведения мероприятий по защите спасателей. Выявленная проблематика показала необходимость постановки и решении научной задачи заключающейся в разработке научно-методический аппарата обоснования рациональных параметров системы защиты личного состава спасательных формирований при проведении аварийно-спасательных работ в условиях обрушений зданий и сооружений.

**Ключевые слова:** аварийно-спасательные работы, безопасность, защита, методика, модель, научно-методический аппарат, обрушение, опасности, риск, спасатель, чрезвычайная ситуация.

# ABOUT THE RESULTS OF ANALYSIS OF THE SCIENTIFIC AND METHODOLOGICAL APPARATUS IN THE FIELD OF PROTECTING RESCUE PROTECTION

© The Author(s) 2024

**RYBAKOV Anatoly Valerievich,** doctor of technical sciences, professor,

professor of the Department Higher Mathematics
*Academy of Civil Defense of the Ministry of Emergency Situations of Russia*
*(141435, Russia, Moscow region, Khimki city district, Novogorsk, Sokolovskaya str., 1A,*
*e-mail: a.rybakov@agz.50.mchs.gov.ru)*
**PETRENKO Pavel Pavlovich,** post graduate student of the research center
*Academy of Civil Defense of the Ministry of Emergency Situations of Russia*
*(141435, Russia, Moscow region, Khimki city district, Novogorsk, Sokolovskaya str., 1A,*
*e-mail: p.petrenko@agz.50.mchs.gov.ru)*
**IVANOV Evgeny Vyacheslavovich,** phd. tech. sci.,
associate professor of the Emergency Rescue Department Command and Engineering Faculty
Academy of Civil Defense of the Ministry of Emergency Situations of Russia
*(141435, Russia, Moscow region, Khimki city district, Novogorsk, Sokolovskaya str., 1A,*
*e-mail e.ivanov@agz.50.mchs.gov.ru)*
**MYASNIKOV Denis Vladimirovich,** phd. tech. sci., associate professor,
associate professor of the Emergency Rescue Department Command and Engineering Faculty
Academy of Civil Defense of the Ministry of Emergency Situations of Russia
*(141435, Russia, Moscow region, Khimki city district, Novogorsk, Sokolovskaya str., 1A,*
*e-mail: myasnikovdenis@mail.ru)*

**Abstract.** The article considers the scientific and methodological apparatus in the field of ensuring the protection of the personnel of rescue teams during emergency rescue operations. The methods of assessing the risk of professional activities of rescuers taking into account the factors affecting their protection during emergency rescue operations in the conditions of collapses of buildings and structures were analyzed, problematic issues were identified and solutions were proposed. Incidents related to explosions and destruction in buildings and structures of industrial, residential, social, cultural, administrative purposes, communications and infrastructure-significant facilities pose a threat to the safety of the forces involved in the elimination of such accidents. Incidents related to explosions and destruction in buildings and structures of industrial, residential, social, cultural, administrative purposes, communications and infrastructure-significant facilities pose a threat to the safety of the forces involved in the elimination of such accidents. The currently used models for assessing the acceptability of occupational risk do not allow quantifying the degree of protection of rescuers directly at the work site in the conditions that have been created at the emergency site and timely adjust the plan of measures to protect rescuers. The identified problems showed the need to set and solve the scientific problem of developing a scientific and methodological apparatus for justifying the rational parameters of the protection system for the personnel of rescue teams during emergency rescue operations in the conditions of collapses of buildings and structures.

**Keywords:** emergency rescue operations, safety, protection, methodology, model, scientific and methodological apparatus, collapse, hazards, risk, rescuer, emergency.

***Для цитирования:*** *Рыбаков А.В. О результатах анализа научно-методического аппарата в области обеспечения защиты спасателей / А.В. Рыбаков, П.П. Петренко, Е.В. Иванов, Д.В. Мясников // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 2(66). – С. 150-155. – EDN: BBWJNW.*

**Введение.** Среди техногенных чрезвычайных ситуаций особое место занимают случаи связанные с обрушением зданий, сооружений, вне зависимости от причин их вызвавших [1].

В период с 2020 по 2023 год произошло более 50 взрывов газовоздушной смеси, 10 из которых произошли в многоквартирных домах с последующим их обрушением [2]. Участились случаи возникновения разрушений зданий и сооружений в связи с применением противником обычных средств поражения в ходе специальной военной операции проводимой Российской Федерацией [3].Также возросла угроза разрушения зданий в результате террористических актов [4] (рис. 1).




*Рисунок 1 – Иллюстрация разрушений КЗ Крокус Сити Холл в результате террористического акта 22.03.2024 г.*

Несмотря на усилия в области охраны труда спасателей, в России ежегодно фиксируются несчастные случаи при проведении аварийно-спасательных работ [5]. С целью выявления их причин и принятия управленческих решений по минимизации риска получения спасателями травм при ведении работ по разбору завалов необходимо провести анализ известного научно-методического аппарата в области обеспечения защиты личного состава спасательных формирований при проведении аварийно-спасательных работ в условиях обрушений зданий и сооружений.

**Методология.** Основными факторами, влияющими на защищенность спасателей в завалах являются: угроза обрушения разбалансированных конструкций; применение аварийно-спасательного инструмента, также являющегося дополнительным фактором травматизма; технологии ведения аварийно-спасательных работ, когда работы ведутся в ограниченном пространстве; работа на высоте. Правильное определение основных источников опасности на каждой чрезвычайной ситуации позволит руководителю работ принять обоснованное решение на применение безопасных методов работы и защитной экипировки (рис. 2).

Исчерпывающий перечень опасностей, возникающих при ликвидации последствий ЧС, а также мероприятий по защите спасателей от них приведен в методических рекомендациях [6].

Согласно проведенным исследованиям, опасности возникающие при проведению аварийно-спасательных работ в условиях разрушений зданий и сооружений характеризуются высокой частотой проявления и тяжелыми последствиями для спасателя [6].

Конституцией гарантируется право на безопасные условия труда каждому гражданину [7], в том числе и спасателю.



*Рисунок 2 – Условия проведения работ на площадке КЗ Крокус Сити Холл*

Основным нормативно-правовым документом, регламентирующим необходимость обеспечения безопасных условий профессиональной деятельности, является Трудовой кодекс Российской Федерации [8]. В нем отражены основные положения, принципы и направления обеспечения безопасности труда, а также обязанности работодателей и работников в данной области. Однако, работодатель, в частности руководитель работ на месте ликвидации ЧС, сопровождающейся обрушением зданий и сооружений, оказывается не способен в полной мере выполнить требования по обеспечению безопасных условий выполнения работ ввиду наличия различных объективных факторов. Данное положение свидетельствует о необходимости выработки специальных мер защиты (обосновании рациональных параметров системы защиты).

Основу научно-методического аппарата составляют:

– нормативно-правовая база в области обеспечения защиты спасателей;

– проведенные научно-исследовательские работы;

– учебная и методическая литература.

Наиболее известной учебно-методической работой, посвященной в том числе безопасным приемам работы спасателей и выживанию в чрезвычайных ситуациях, является «Учебник спасателя» [9]. В нем представлена технология проведения поисково-спасательных работ в завалах, состоящая из пяти этапов:

Этап № 1. Изучение и анализ обстановки, оценка степени разрушения, установление зоны разрушения, маркировка. Оценка устойчивости строений и конструкций. Организация безопасных условий работы спасателей.

Этап № 2. Оказание оперативной помощи пострадавшим, находящимся на поверхности завала.

Этап № 3. Тщательный поиск пострадавших с использованием всех имеющихся средств и методов поиска.

Этап № 4. Частичная разборка завала с использованием тяжелой техники для оказания помощи пострадавшим.

Этап № 5. Общая разборка (расчистка) завала после извлечения всех пострадавших.

**Результаты.** Таким образом, обеспечение безопасных условий труда спасателя должно организовываться на всех этапах проведения аварийно-спасательных работ. При этом следует учитывать, что на разных этапах работ воздействие могут оказывать разные факторы, с разной интенсивностью. В свою очередь решение по конкретным мерам, обеспечивающим безопасность должно приниматься на первом этапе работ исходя из анализа сложившейся обстановки и в дальнейшем только уточняться.

В учебнике спасателя также отражены основные безопасные приемы проведения спасательных работ. Однако, несмотря на это, в данной работе не приведены конкретные мероприятия, которые необходимо провести в целях обеспечения защиты личного состава спасательных подразделений, а представленные безопасные приемы касаются только техники спасания.

Реализация методических рекомендаций по разработке системы управления охраной труда в МЧС России [6] позволяет сформировать полный план мероприятий по защите личного состава спасательных формирований при проведении аварийно-спасательных работ в условиях обрушений зданий и сооружений. Однако в рассматриваемых рекомендациях не учитывается количественное значение поражающих факторов и технические характеристики средств защиты от них. Иными словами, предложенная методика позволяет сформировать унифицированный план для каждого вида ЧС, без учета ее специфики.

Кроме этого, в качестве показателя эффективности системы защиты спасателей используется индекс профессионального риска. Такой подход внедряется не только в профессиональной деятельности спасателя, но и в других сферах. Положительной чертой метода является возможность комплексной оценки всех потенциальных опасностей, в частности из соотношения частоты реализации опасностей и возможного ущерба, обосновать подход к минимизации последствий несчастных случаев.

На основе обработке статистических данных по гибели и травматизму спасателей построена матрица «оценки профессиональных рисков», позволяющая определить показатель уровня риска для каждого случая, на основе значения тяжести возможного ущерба и частоты события.

Проведенный анализ соотношения «частоты реализации опасностей – тяжести последствий их реализации» позволил перейти к следующей качественной шкале оценки профессионального риска спасателей [10]:

Низкий – для *H1-H3;*

Средний – для *C4-C6;*

Высокий – для *B8-B10.*

Такая качественная оценка позволяет спланировать и организовать проведение мероприятий минимизации риска (повышения защищенности спасателей при проведении аварийно-спасательных работ) за счет реализации мер управления:

– оценка 1: меры управления внедрены, и профессиональный риск является контролируемым;

– оценка 2: меры управления внедрены частично, профессиональный риск контролируется слабо;

– оценка 3: меры управления отсутствуют, риск является неконтролируемым.

Неприемлемый риск определяется высокой частотой реализации опасных факторов и их высоким уровнем воздействия на спасателя, что требует реализации мер управления процессом безопасности по направлению минимизации частоты возникновения неблагоприятных событий или минимизации их последствий.

Для риска допустимого требуется постоянный контроль за его состоянием, с целью не допустить перехода в область неприемлемого риска. При этом дополнительных мероприятий проводить не требуется.

Приемлемый уровень риска предполагает, что дополнительные меры безопасности не требуются., поскольку реализация опасностей будет являться случайным событием и достоверно повлиять на них мы не можем.

Представленная в методике [6] модель оценки приемлемости профессионального риска не позволяет количественно выразить степень защиты спасателей непосредственно на данном участке работ в тех условиях, которые создались на месте ЧС и своевременно скорректировать план проведения мероприятий по защите спасателей. Кроме того, неоднократный переход от количественной оценки параметров профессионального риска к качественной снижает достоверность данной модели.

**Обсуждение.** Таким образом, можно заключить, что управление безопасностью спасателя во время ведения аварийно-спасательных работ является актуальной задачей, требующей комплексных знаний, как по потенциальным опасностям, так и по средствам защиты, технологиям ведения работ, которые определяют состояние защищенности.

Обоснование текущего состояния системы защищенности спасателя возможно за счет применения описанных выше методов, базирующихся на риск-ориентированном подходе. Вместе с тем данный метод не отвечает на вопрос о перечне и объемах рациональных мероприятий, направленных на минимизацию риска, а также не позволяет провести оценку по отсутствующей статистике новых, внедряемых технологий ведения работ и применения современных аварийно-спасательных средств и экипировки спасателей. Каждый новый способ, а также новые средства, применяемые спасателями в своей профессиональной деятельности, создают новые

опасные и вредные факторы, способные увеличить риск получения травмы спасателем. С другой стороны, внедрение новых образцов экипировки, предназначенной для обеспечения безопасных условий труда спасателя, снижает риск на некоторую величину, которую тяжело оценить количественно с помощью традиционных методов, описанных выше.

Как уже было сказано ранее, получение травмы (гибели спасателя) является случайным событием, предсказать которое на определенном отрезке времени довольно сложно, поскольку на него влияет множество детерминированных факторов. Исходя из этого предположения можно сделать вывод о возможности использования основных положений теории вероятности и математической статистики при анализе травматизма и выработке решений по его снижению.

Кроме того, учитывая, что аварийно-спасательные работы проводятся по нескольким этапам (как параллельно, так и последовательно), к ним вполне применимы положения теории надежности, которые будут учитывать не только состояние спасателя, но и системы спасатель-аварийно-спасательные средства.

Комплексное применение перечисленных методов позволит проводить оценку текущего состояния безопасности труда и прогнозировать состояние безопасности спасателя по этапам ведения работ, для чего необходимы глубокие знания и практика в использовании сведений из области специальных дисциплин, смежных с безопасностью аварийно-спасательных работ.

**Выводы.** На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что разработке и обоснованию реализации особых мероприятий по защите спасателей посвящено немало работ [9-12]. Многие авторы учебников и пособий, статей и методических рекомендаций рассматривают необходимость осуществления тех или иных мероприятий по защите личного состава спасательных подразделений при проведении работ в условиях обрушения зданий и сооружений. Однако в своих исследованиях ими не уделяется внимание обоснованию необходимой и достаточной части проводимых мероприятий, их объему и техническим характеристикам, что в области обеспечения безопасности спасателей имеет значительное влияние.

Таким образом, на основе анализа существующих подходов к обеспечению защиты (защищенности) спасателя можно сделать вывод об отсутствии системного подхода к обеспечению защиты спасателей.

Под системой защиты спасателей нужно понимать совокупность следующих элементов, представленных на рисунке 3.

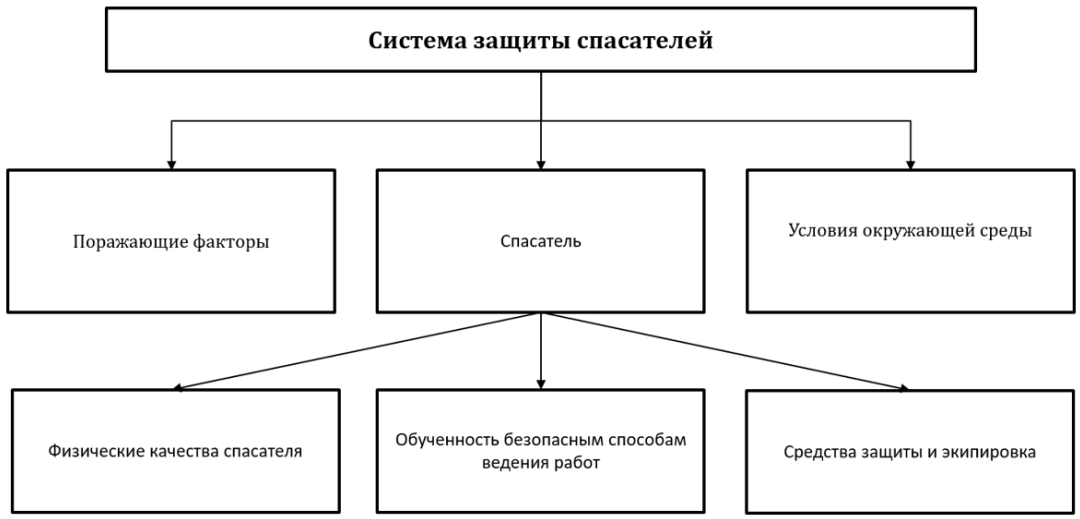



*Рисунок 3 – Система защиты спасателей*

Указанные выше элементы системы защиты спасателей характеризуются параметрами:

1. Поражающие факторы: разлет обломков и осколков, тепловое излучение и др. [13].

2. Спасатель: уровень сигнала об опасности, устойчивость к механическим повреждениям и др.

3. Условия окружающей среды: температура, влажность, освещенность и др.

С помощью рассмотренного научно-методического аппарата не могут быть решены следующие задачи:

– оценка текущего значения показателя эффективности системы защиты спасателей в условиях разрушений зданий и сооружений;

– оценка риска профессиональной деятельности спасателя на месте проведения работ в условиях разрушений зданий и сооружений;

– управление риском на месте проведения работ в условиях разрушений зданий и сооружений;

– количественная оценка влияния параметров системы защиты на итоговое значение защищенности спасателя при ведении работ в условиях обрушений зданий и сооружений;

– идентификация и оценка влияния опасных факторов профессиональной деятельности на эффективность системы защиты спасателей на месте

проведения работ в условиях разрушений зданий и сооружений

– учета ограничений на требования к выполнению работ и финансовые ресурсы.

Выявленная проблематика показала необходимость постановки и решении научной задачи, заключающейся в разработке комплексной методики обоснования рациональных параметров системы защиты личного состава спасательных формирований при проведении аварийно-спасательных работ в условиях обрушений зданий и сооружений с учетом ограничений на требования к выполнению работ и финансовые ресурсы.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2021 году» – Документ - МЧС России. – URL: https://mchs.gov.ru/dokumenty/5946 (дата обращения: 02.02.2023). – Текст: электронный.

2. Обзор аварийных взрывов газовоздушной смеси в многоквартирных жилых домах, с последующим обрушением строительных конструкций здания (сооружения) в 2020-2023 годах. – URL: https://fireman.club/literature/obzor-avarijnyh-vzryvov-gazovozdushnoj-smesi-2020-2023-godah/ (дата обращения: 25.03.2024). – Текст: электронный.

3. Обрушение части дома в центре Белгорода после нового обстрела попало на видео. – URL: https://bel.ru/news/2024-03-24/obrushenie-chasti-doma-v-tsentre-belgoroda-posle-novogo-obstrela-popalo-na-video-5035091 (дата обращения: 25.03.2024). – Текст: электронный.

4. Правда, Р.К. Теракт Крокус. – URL: https://radiokp.ru/player/730965/kp.ru (дата обращения: 25.03.2024). – Текст: электронный.

5. 2022 год – Итоги деятельности МЧС России – МЧС России. – URL: https://mchs.gov.ru/deyatelnost/itogi-deyatelnosti-mchs-rossii/2022-god (дата обращения: 12.02.2024). – Текст: электронный.

6. Распоряжение МЧС России от 31.03.2021 N 249 «Об утверждении Методических рекомендаций по разработке системы управления охраной труда в МЧС России» | ГАРАНТ. – URL: https://base.garant.ru/401457858/ (дата обращения: 12.02.2024). – Текст: электронный.

7. Конституция России Документы Президент России. – URL: http://www.kremlin.ru/acts/constitution (дата обращения: 13.02.2024). – Текст: электронный.

8. Раздел X. ТК РФ Охрана труда (ст. 209-231) | ГАРАНТ. – URL: https://base.garant.ru/12125268/b89690251be527781 2a78962f6302560/ (дата обращения: 13.02.2024). – Текст: электронный.

9. Учебник спасателя. – URL: https://www.rulit.me/books/uchebnik-spasatelya-download-411749.html (дата обращения: 15.12.2023). – Текст: электронный.

10. Оценка профессиональных рисков личного состава МЧС России / В.В. Артюхин, М.А. Балер, О.А. Морозова, В.С. Путин // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2021. – № 3. – С. 113-121.

11. Арифуллин, Е.З. Основы безопасности ведения аварийно-спасательных работ: учебное пособие. Основы безопасности ведения аварийно-спасательных работ / Е.З. Арифуллин, А.В. Звягинцева, П.С. Куприенко. – Воронеж: Воронежский гос. технический ун-т, 2014. – 248 с. – URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01007921976 (дата обращения: 27.03.2024). – Текст: электронный.

12. Принципы обеспечения безопасности спасательных работ / Н.Р. Артаменко, М.А. Карпин, Д.А. Карпин // Экономика и социум. – 2017. – № 11 (42). – С. 1084-1086.

13. ГОСТ 22.0.07-2022. Межгосударственный стандарт: «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Источники техногенных чрезвычайных ситуаций. Классификация и номенклатура поражающих факторов и их параметров» (введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 10.02.2023 № 81-ст) | ГАРАНТ. – URL: https://base.garant.ru/406498281/ (дата обращения: 27.03.2024). – Текст: электронный.

*Статья поступила в редакцию 02.04.2024*
*Статья принята к публикации 17.06.2024*

УДК 331.45
EDN: BHMTDL

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НА РАБОЧИХ МЕСТАХ ПРИ ШАРИКО-СТЕРЖНЕВОМ УПРОЧНЕНИИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НЕСУЩИХ РАМ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

© Автор 2024
SPIN: 2004-0779
Author ID: 776124
ORCID: 0000-0001-8986-7353
Researcher ID: KXK-7736-2024
Scopus ID: 57194328031

**ИСАЕВ Александр Геннадьевич**, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Робототехника и мехатроника
*Донской государственный технический университет*
*(344000, Россия, Ростов-на-Дону, площадь Гагарина 1, e-mail: isaev278@mail.ru)*

**Аннотация.** Известно, что сварка относится к одному из популярных процессов соединения металлических конструкций. Сварное соединение является неоднородным, а его механические характеристики изменяются по мере удаления от сварного шва. Однако анализ работ, посвящённых данному вопросу, показал, что сварной шов значительно неоднороден, а механические свойства в различных зонах сварного соединения постоянно изменяются. Это может влиять как на надежность, так и на безопасность эксплуатации таких конструкций. В связи с этим для обработки участков сварного соединения был предложен метод шарико-стержневого упрочнения, показавший свою эффективность при упрочнении поверхностей деталей. Однако процесс обработки характеризуется высоким уровнем шума, часто превышающим допустимые нормы в рабочей зоне оператора. В данной статье представлены результаты экспериментальных исследований обработки зон сварного соединения шарико-стержневым упрочнителем. Представлены уровни превышения шума и вибрации при обработки стержневых конструкций различной формы, а также измерения уровней звукового давления, выполненные на рабочих местах операторов при работе оборудования на холостом ходу и во время обработки сварных швов. Анализ выполненных результатов подтверждает теоретические предположения о спектрах шума и вкладе источников шума в звуковое поле рабочего места.

**Ключевые слова:** сварное соединение, стержневые конструкции, шарико-стержневой упрочнитель, уровни звукового давления, спектры шума, спектры вибрации, акустическая безопасность.

# EXPERIMENTAL STUDIES OF ACOUSTIC CHARACTERISTICS AT WORKPLACES DURING BALL-ROD STRENGTHENING OF WELDED JOINTS OF LOAD-BEARING FRAMES OF TRANSPORT AND AGRICULTURAL MACHINES

© The Author 2024
**ISAEV Alexander Gennadievich**, candidate of technical sciences,
associate professor of the Department of Robotics and Mechatronics
*Don State Technical University*
*(344000, Russia, Rostov-on-Don, Gagarin Square 1, e-mail: isaev278@mail.ru)*

**Abstract.** It is known that welding refers to one of the most popular processes of joining metal structures. The welded joint is inhomogeneous, and its mechanical characteristics change with distance from the weld. However, an analysis of the works devoted to this issue has shown that the weld is significantly heterogeneous, and the mechanical properties in different zones of the welded joint are constantly changing. This can affect both the reliability and the safety of operation of such structures. In this regard, a ball-rod hardening method has been proposed for the treatment of welded joint sections, which has shown its effectiveness in hardening the surfaces of parts. However, the processing process is characterized by a high noise level, often exceeding the permissible standards in the operator's work area. This article presents the results of experimental studies of the treatment of welded joint zones with a ball-rod hardener. The levels of excess noise and vibration during the processing of rod structures of various shapes are presented. Measurements of sound pressure levels at the operator's workplace during equipment operation and during weld processing are also presented, confirming theoretical assumptions about noise spectra and the contribution of noise sources to the sound field of the workplace.

**Keywords:** ball-rod hardener, sound pressure levels, noise spectra, vibration spectra, acoustic safety, welded joint, rod structures.

***Для цитирования:*** *Исаев А.Г. Экспериментальные исследования акустических характеристик на рабочих местах при шарико-стержневом упрочнении сварных соединений несущих рам транспортных машин / А.Г. Исаев // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 2(66). – С. 156-160. – EDN: BHMTDL.*

**Введение.** В различных отраслях машиностроения зачастую в качестве соединения металлических конструкций используют сварку за счет своей доступности. Однако любое сварное соединение значительно неоднородно, в котором механические характеристики изменяются по мере удаления от сварного шва. В работах, посвященных данному вопросу [1-3] отмечается, что наивысшие значения прочности наблюдаются в центре сварного шва и при удалении к основному металлу снижается, достигая наименьших значений в зоне термического влияния и далее возрастает до значений твердости основного металла. Такое изменение механических характеристик в зоне сварного соединения может привезти к разрушению особо нагруженных металлических конструкций, поэтому надежность таких конструкций является важной научной задачей.

Повышению прочности сварных соединений посвящено множество научных работ, включающие различные технологические воздействия на зоны сварного соединения. Особенно эффективно отмечено использование механических способов обработки поверхностного слоя концентратора напряжения. Одним из таких устройств является шарико-стержневой упрочнитель, разработанный в рамках научной школы под руководством профессора Бабичева А.П. [4], которое показала свою эффективности при упрочнении наиболее ответственных деталей.

Общий вид и устройство представлено на рисунке 1.

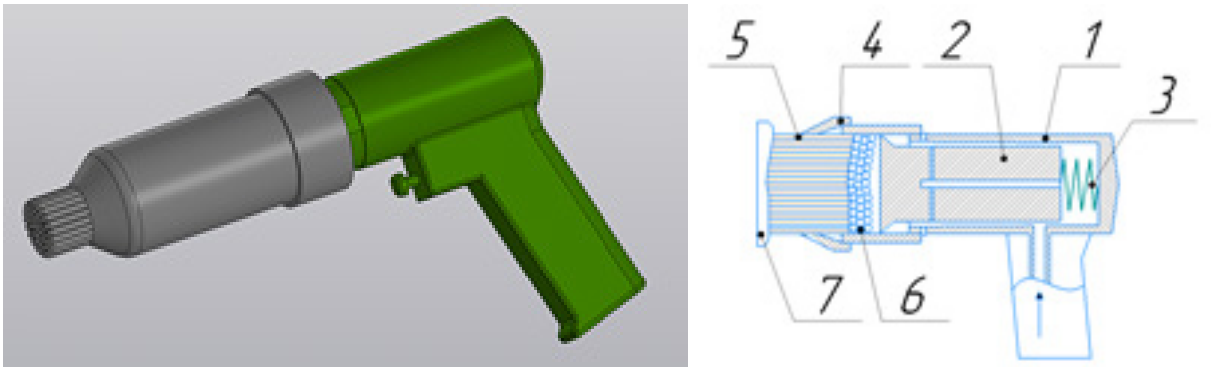



*Рисунок 1 – Шарико-стержневой упрочнитель: 1 – корпус пневматического молотка, 2 – боек пневматического молотка, 3 – пружина, 4 - цанговый зажим, 5 – индентор для воздействия на поверхность детали имеющий сферическую заточку, 6 – стальные шарики, 7 – поверхность детали, подвергающаяся упрочнению*

Эффективность применения данного метода показывают результаты проведённых исследований по моделированию упрочнения зон сварного соединения, которые учитывают воздействие индентора на обрабатываемую поверхность [5] и позволяют получить напряженно-деформационное состояние сварного соединения. Однако отмечено, что процесс упрочнения сопровождается превышение норм значений шума и вибрации в большом частотном диапазоне [6, 7]. А как известно, обеспечение санитарных норм шума и вибрации является актуальной задачей.

**Методология.** Процесс упрочнения подразумевает воздействия индентора со сферической заточкой из пакета стержней в упрочнителе на поверхность детали. При этом привод устройства осуществляется при помощи компрессора, а его подача может осуществляться как ручным способом, так и при помощи фрезерного станка. Учитывая это, можно предположить, что источниками шумового воздействия являются сам компрессор, упрочняемая поверхность изделия и шарико-стержневой упрочнитель. Исследования показали, что превышение уровней шума от компрессора незначительны и могу не учитывается при формировании общего шумового поля [8-10]. Превышения составляют в среднечастотном диапазоне на 5 дБ в четвертой октаве и на 4 дБ в пятой октаве (рис. 2).

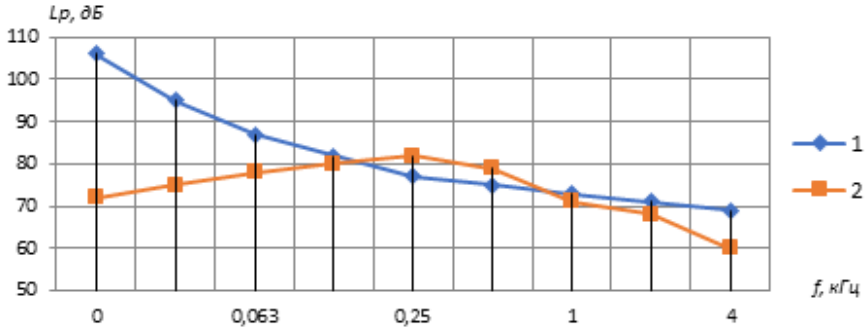



*Рисунок 2 – Спектры шума: 1 – предельно допустимые уровни, 2 – уровни звукового давления компрессора*

При обработке рамных конструкций типа швеллеров и уголков проводились экспериментальных исследования виброакустических факторов. Так как эти детали имеют различные геометрические размеры учитывая номер профиля и, в связи с этим представленные результаты таких исследований отображают наивысшие значения превышений звукового давления для возможности обеспечения безопасных условий труда для различных условий. Измерение уровней шума и вибрации производились анализатором шума и вибрации «Ассистент Total» в широком частотном диапазоне от 2 до 40000 Гц.

**Результаты.** Спектры шума при упрочнении сварных соединений конструкций типа швеллеров и уголков приведены на рисунках 3-5. При всех процессах обработки методом ШСУ спектры шума имеют ярко выраженный высокочастотный характер. В четвертой октаве среднечастотного диапазона имеются превышения допустимых уровней звукового давления, однако максимальные значения отмечаются в высокочастотном диапазоне, что негативно сказывается на условиях труда [11-13]. Превышения наблюдаются в вышеуказанном диапазоне при обработке поверхности методом ШСУ швеллеров по схеме «а», а максимальное значение также при обработке ШСУ по схеме «б» (рис. 3).

Аналогичные результаты получены при упрочнении уголков различных геометрических размеров, и разница в условиях звукового давления составляет 3-6 дБ.

Уровни звукового давления при упрочнении ШСУ уголков приведены на рисунке 4, которые, как и при анализе спектров при упрочнении швеллеров в данном случае закономерности проанализированы для наиболее шумных условий.

Фактически уровни звукового давления при упрочнении сварных швов занимают промежуточное положение между уровнями звукового давления при упрочнении сварных швов на швеллерах. Объясняется это тем, что для рассмотренных вариантов различаются жесткости технологической системы. Действительно, наиболее жесткой является технологическая система при установке швеллера по схеме «а» (рис. 3). Жесткость системы при установке уголка выше, чем при обработке швеллера по схеме «б» (рис. 3).

Измерения спектров вибраций представлены на рисунке 5.

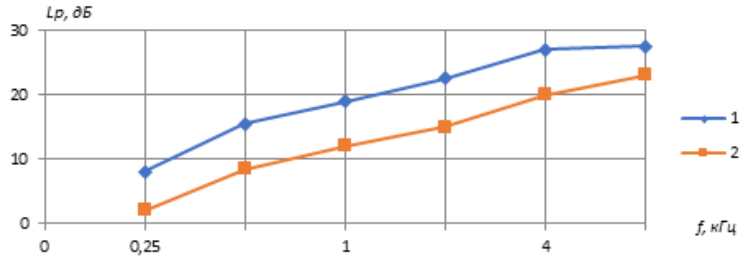



*Рисунок 3 – Превышения уровней звукового давления при упрочнении сварных швов швеллеров: 1 – по схеме а, 2 – по схеме б.*

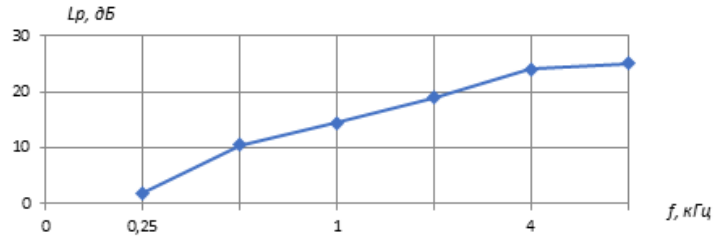



*Рисунок 4 – Превышения уровней шума при упрочнении сварных швов на уголках*

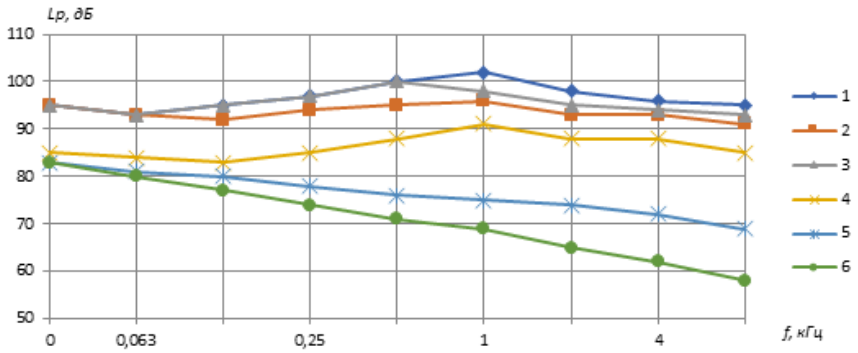



*Рисунок 5 – Спектры вибраций при обработке ШСУ: 1 – швеллера при установке по схеме «а», 2 – швеллера при установке по схеме «б», 3 – уголка, 4 – упрочнителя, 5 – на столе станка, 6 – на станине*

**Обсуждение.** Полученные в ходе исследования результаты подтверждают правильность полученных ранее теоретических зависимостей [14-16]. Также результаты проведенных исследований говорят о том, что источники шума в процессе упрочнения сварных соединений имеют значительное влияние на формирование звукового поля на рабочем месте и дают значительный вклад в общий шумовой фон. Стоит отметить, что характер спектра вибраций на упрочнителе и заготовках соответствует спектрам шума, что свидетельствует о их важной роли вибрации в процессе формирования шума. Уровни вибраций на заготовках оказались выше, чем на упрочнителе, на низких и средних частотах на 10-12 дБ, а на высоких частотах на 7-10 дБ, что может иметь значительное влияние на комфорт и безопасность работы операторов. Кроме того, наблюдается различие в уровнях вибраций в зависимости от частоты, что также может быть важным при оценке влияния шума на операторов и разработке мер по его снижению.

Анализ спектра вибрации несущей системы станка имеют четко выраженный низкочастотный характер, а в средне и высокочастотном диапазоне уровни вибраций на станине станка на 20-30 дБ ниже, чем на заготовке и инструменте. Это говорит о том, что основные источники вибраций на станке находятся в инструменте и заготовке, а не в самой системе станка. Возможно, что низкочастотные вибрации вызваны неравномерностью материала заготовки или несовершенствами в инструменте.

**Выводы.** Результаты экспериментальных исследований подтверждают справедливость теоретического подхода, описывающего закономерности процесса образования шума. Определяя, основными доминирующими факторами шума, является тип упрочняющего инструмента, скорость обработки и выбор материала заготовки [17-20].

Превышение уровней звукового давления при упрочнении сварных соединений представлено на рисунке 6.

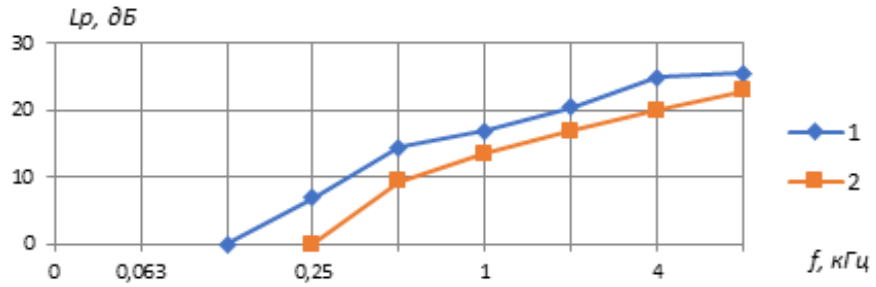



*Рисунок 6 – Превышение уровней звукового давления*
*1 – при работе одной установки, 2 – на участке упрочнения сварных швов*

В случае эксплуатации одной ШСУ на рабочем месте оператора превышения уровней звукового давления составляют 8-28 дБ. Следует отметить закономерность «неравномерности» увеличения пре-\вышений уровней звукового давления в диапазоне частот, так, например, при переходе от четвертой к пятой октаве уровень звукового давления увеличивается на 18 дБ, а от пятой к шестой и от шестой к седьмой октаве увеличение уровней звукового давления составляет соответственно 5 и 3 дБ; в восьмой октаве увеличение уровня звукового давления составляет 12 дБ, а девятой – 5 дБ. При одновременном использовании нескольких установок для упрочнения сварных швов превышение санитарных нормам увеличивается на 4-5 дБ и достигает 15-33 дБ.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Sukarman F Ismail M Shah M Ramli M Tharazi I 2020 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 834 012046.
2. He H, Forouzan F, Volpp J, Robertson SM, Vuorinen E. Microstructure and Mechanical Properties of Laser-Welded DP Steels Used in the Automotive Industry. Materials, 14(2), 456 (2021). https://doi.org/10.3390/ma14020456.
3. Lee, H.W., Yoo, K.J., Tran, M.T., Moon, I.Y., Oh, Y., Kang, S., Kim, D. 2019 Effect of Quenching Tempering-Post Weld Heat Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of Laser-Arc Hybrid-Welded Boron Steel. Materials, 12. – 2862.
4. 1539051. Устройство для поверхностной отделочно-упрочняющей обработки деталей / Бабичев И.А. и др. Опубликовано в Б.И. №4, 1990. – С. 37.
5. Strengthening of Welded Joints of Load-Bearing Structures of Robotic Systems with Ball-Rod Hardening / A. Beskopylny, B. Meskhi, N. Beskopylny [et al.] // Smart Innovation, Systems and Technologies. – 2022. – Vol. 247. – P. 1-11. – DOI 10.1007/978-981-16-3844-2_1. – EDN: WDLMAL.
6. Промышленная санитария и гигиена труда. Здоровье и работоспособность / М.В. Белавкина, А.В. Борисова, А.В. Лысенко [и др.]. – Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2022. – 108 с. – ISBN 978-5-907494-06-0. – EDN: AMEICP.
7. Баланова, М.В. Методика и техническое обеспечение проведения экспериментальных исследований по определению шума на рабочих местах / М.В. Баланова, Т.А. Финоченко, И.А. Яицков // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 1. – С. 5-7. – EDN: MKAIVJ.
8. Kravchenko, M.A. Theoretical substantiation of the parameters of the vibration protection system for the workplaces of compressor plant operators / M.A. Kravchenko, T.A. Finochenko, A.N. Chukarin // E3S Web of Conferences. – 2023. – V. 458. – P. 04024. – DOI 10.1051/e3sconf/202345804024. – EDN: JHDCYN.
9. Model validation of the acoustic systems "tooth wheels-mandrels" of the vertical gear generator and gear shaping machines / S. Ryzhov, T. Finochenko, A. Chukarin, I. Yaitskov // Akustika. – 2021. – V. 41. – P. 90-93. – DOI 10.36336/akustika20214190. – EDN: UTYWXV.
10. Исаев, А.Г. Вывод зависимостей скоростей колебаний стержневых систем при упрочнении сварных швов для

снижения уровней шума на рабочем месте оператора / А.Н. Чукарин, А.Г. Исаев, К.Е. Аббакумов, А.А. Лубянченко // Noise Theory and Practice. – 2020. – Т. 6, № 4(22). – С. 60-70. – EDN: ACOQTE.

11. Морозов, С.А. Экспериментальные исследования шума и вибрации при местном упрочнении деталей шарико-стержневым упрочнителем / С.А. Морозов, А.Н. Чукарин, Т.А. Финоченко // Мониторинг. Наука и технологии. – 2019. – № 1(39). – С. 65-69. – DOI 10.25714/MNT.2019.39.009. – EDN: ZQYSLR.

12. Яицков, И.А. Проблемы негативного воздействия производственного шума на работников железнодорожного транспорта / И.А. Яицков, И.Г. Переверзев, Т.А. Финоченко // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 4. – С. 112-114. – EDN: YURPTF.

13. Методические рекомендации по оценке условий труда для основных профессий ОАО РЖД / В.А. Финоченко, Т.А. Финоченко, В.А. Назимко [и др.]. – Ростов-на-дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2012. – 73 с. – EDN: RJOHZP.

14. Исаев, А.Г. Исследование шума при обработке плоских деталей шарико-стержневым упрочнителем / А.Г. Исаев, М.А. Тамаркин, С.А. Раздорский // Вестник Донского государственного технического университета. – 2017. – Т. 17. – № 1(88). – С. 99-104. – DOI 10.23947/1992-5980-2017-17-1-99-104. – EDN: YINJQT.

15. Иванов, Н.И. Основы виброакустики / Н.И. Иванов, А.С. Никифоров. – Санкт-Петербург: Политехника, 2000. – 482 с.

16. Яицкова, Н.М. Снижение шума металлорежущих станков / Н.М. Яицкова, Т.А. Финоченко, И.Г. Переверзев // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 2(51). – С. 112-115. – EDN: BIWPKX.

17. Исаев, А.Г. Теоретические исследования процессов возбуждения вибраций и шумообразования при абразивной обработке сварных швов рамных конструкций / Чукарин А.Н., Исаев А.Г., Шашурин А.Е., Элькин Ю.И. // Noise Theory and Practice. – 2020. № 4 (22). – С. 71-80. – EDN: FTGEJL.

18. Исаев, А.Г. Исследования виброакустических характеристик в рабочей зоне оператора при абразивной обработке сварных швов / Чукарин А.Н., Бескопыльный А.Н., Исаев А.Г. // Безопасность труда в промышленности. 2019. – № 11 – С. 7-12. – DOI: 10.24000/0409-2961-2019-11-712.

19. Чукарин, А.Н. Обеспечение комфортных условий труда при виброударной отделочной обработке фасонных деталей за счет снижения вибраций и шума / А.Н. Чукарин, Л.М. Щерба // Прогрессивные технологии в машино- и приборостроении: сб. ст. по матер. Всерос. науч.-техн. конф. – Нижний Новгород; Арзамас, 2002. – С. 352-355.

20. Финоченко, Т.А. Состояние психосоматического здоровья в неблагоприятных условиях профессиональной деятельности / Т.А. Финоченко, А.В. Лысенко, Д.С. Лысенко. – Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2017. – 101 с. – EDN: YSJVPI.

*Статья поступила в редакцию 17.04.2024*
*Статья принята к публикации 17.06.2024*

УДК 502:331.45
EDN: PDTLML

# ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНЫХ УСЛОВИЙ ТРУДА РАБОТНИКОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХОЗЯЙСТВ ПРЕДПРИЯТИЙ

© Авторы 2024
SPIN: 6554-9950
AuthorID: 353693
ORCID: 0000-0002-0902-0492
**КОСТЮКОВ Александр Владимирович**, кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Теоретические основы электротехники»
*Ростовский государственный университет путей сообщения*
*(344038, Россия, г. Ростов-на-Дону, площадь Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2, e-mail: kav@rgups.ru)*

SPIN: 2232-0626
AuthorID: 522176
ORCID: 0000-0002-9229-5795
**ФИНОЧЕНКО Татьяна Анатольевна**, кандидат технических наук, доцент,
заведующая кафедрой «Безопасность жизнедеятельности»
*Ростовский государственный университет путей сообщения*
*(344038, Россия, г. Ростов-на-Дону, площадь Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2, e-mail: fta09@bk.ru)*

**Аннотация.** Специфика работы предприятий железнодорожного транспорта предусматривает использование различных видов электрооборудования, в том числе предполагает, помимо производства элементов устройств и оборудования для нужд железнодорожной отрасли, ещё и электроснабжение, распределение и транзит электроэнергии. Многообразие электрооборудования и многоплановость выполняемых работ в области электроэнергетики требуют от обслуживающего персонала соответствующей квалификации, а от руководства предприятий – внедрения комплексной системы управления охраной труда на предприятии с использованием современных организационно-технических мероприятий. Цель исследования: рассмотрение мероприятий, направленных на снижение электротравматизма на ремонтных и эксплуатационных предприятиях железнодорожного транспорта. Был проведён анализ электротравматизма на предприятиях железнодорожной отрасли. Установлено, что большая доля несчастных случаев происходит при эксплуатации и обслуживании силового электрооборудования, а именно: силовых трансформаторов и автотрансформаторов, а также высоковольтных вводов распределительных устройств. Остаётся на высоком уровне электротравматизм при эксплуатации и обслуживании неисправного высоковольтного оборудования – силовых трансформаторов. Многие предприятия оставили в эксплуатации силовые трансформаторы, которые давно превысили свой срок службы, установленный заводом изготовителем. Для исключения и снижения электротравматизма при обслуживании и эксплуатации силовых трансформаторов, которые исчерпали свой ресурс, предлагается использовать диагностические мероприятия, направленные на прогнозирование состояния силовых трансформаторов и выявление причин повреждения элементов конструкции.

**Ключевые слова:** несчастный случай, электротравматизм, производственные факторы, производственная среда, высоковольтное электрооборудование, силовые трансформаторы, методы контроля.

# ENSURING SAFE WORKING CONDITIONS FOR EMPLOYEES OF ENERGY SECTORS OF ENTERPRISES

© The Author(s) 2024
**KOSTYUKOV Alexander Vladimirovich**, candidate of technical sciences, assistant professor,
associate professor of the Department of «Theoretical Foundations of Electrical Engineering»
*Rostov State Transport University*
*(344038, Russia, Rostov-on-Don, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolchenya sq., 2, e-mail: av@rgups.ru)*
**FINOCHENKO Tatiana Anatolievna**, candidate of technical sciences, assistant professor,
head of the Department of Life Safety
*Rostov State Transport University*
*(344038, Russia, Rostov-on-Don, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolchenya sq., 2, e-mail: fta09@bk.ru)*

**Abstract.** The specifics of the work of railway transport enterprises include the use of various types of electrical equipment, including, in addition to the production of elements of devices and equipment for the needs of the railway industry, also power supply, distribution and transit of electricity. The variety of electrical equipment and the versatility of work performed in the field of electrical power require appropriate qualifications from service personnel, and from enterprise management to the introduction of a comprehensive occupational safety management system at the enterprise

using modern organizational and technical measures. Purpose of the study: to consider measures aimed at reducing electrical injuries at repair and operational enterprises of railway transport. An analysis of electrical injuries at enterprises in the railway industry was carried out. It has been established that a large proportion of accidents occur during the operation and maintenance of power electrical equipment, namely: power transformers and autotransformers, as well as high-voltage bushings of switchgear devices. Electrical injuries during the operation and maintenance of faulty high-voltage equipment – power transformers – remain at a high level. Many enterprises have left power transformers in operation that have long exceeded their service life established by the manufacturer. To eliminate and reduce electrical injuries during the maintenance and operation of power transformers that have exhausted their service life, it is proposed to use diagnostic measures aimed at predicting the condition of power transformers and identifying the causes of damage to structural elements.

**Keywords:** accident, electrical injuries, production factors, production environment, high-voltage electrical equipment, power transformers, control methods.

***Для цитирования:*** *Костюков А.В. Обеспечение безопасных условий труда работников энергетических хозяйств предприятий / А.В. Костюков, Т.А. Финоченко // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 2(66). – С. 161-168. – EDN: PDTLML.*

**Введение.** Ремонтные и эксплуатационные предприятия железнодорожного транспорта представляют собой сложную производственную структуру, состоящую из производственных и технологических участков, испытательных лабораторий, энергетических хозяйств, конструкторских бюро и др., которые оснащены необходимым оборудованием для выполнения производственных задач с учётом специфики выполняемых работ.

Опасные и вредные производственные факторы на производстве будут присутствовать и проявляться на любом предприятии в большей или меньшей степени в зависимости от состояния производственной среды (зданий, помещений, инженерных коммуникаций, производственного и энергетического оборудования и др.), а также от эффективной работы средств сигнализации и оповещения, методов контроля и диагностики производственного и технологического оборудования. На предприятиях железнодорожной отрасли, как и на любом промышленном предприятии, будут опасные и вредные производственные факторы: физические (температура нагретых частей корпусов оборудования, шум и вибрация, величина тока, напряжение, электромагнитное излучение, подвижные части машин и электрооборудования и др.), химические (характеризуются содержанием в рабочей зоне воздуха пыли, аэрозолей при выполнении сварочных работ, паров щелочи и кислотных соединений, серы, креозота, дизельного топлива и др.), биологические (патогенные микроорганизмы, споры и др.), психофизические (нервно-психические и физические перегрузки, монотонность и напряжённость трудовых процессов и т.п.) [1].

При рассмотрении несчастных случаев по месту происшествия на предприятиях железнодорожной отрасли установлено, что чаще всего несчастные возникают в помещениях особо опасных – 33%, на территории предприятия – 26%, в помещениях повышенной опасности – 12%, в зонах воздушных линий электропередач и открытых распределительных устройствах – 8%, на строительных площадках – 10,7%, дороге – 4,7%, другое – 5,6%.

В основном травмы получают работники предприятий в помещениях особо опасных и повышенной опасности, к таким помещениям можно отнести тяговые и заводские электрические подстанции, гальванические участки, аккумуляторные, электроцеха, литейные и все помещения, в которых наблюдается наличие двух и более опасных факторов [2].

На предприятиях железнодорожного транспорта наблюдаются различные вредные и опасные производственные факторы, которые зависят от специфики производства (ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация»).

Электротравматизм на ремонтных и эксплуатационных предприятиях железнодорожного транспорта остаётся на сегодняшний день высоким, это объясняется спецификой работы предприятий, использованием как вспомогательного электрооборудования, так и устройств электроснабжения электрических железных дорог с различным уровнем величин напряжений и токов. Поэтому вопросы по снижению электротравматизма на предприятиях железнодорожной отрасли остаются актуальными и руководством уделяется большое внимание организационно-техническим мероприятиям, направленным на внедрение комплексной системы управления охраной труда на предприятиях, а также использованию современных методов контроля над опасными и вредными факторами производственной среды, а также современных средств защиты от влияющих факторов для снижения профессиональных заболеваний и травм на производстве.

**Методология.** Производственные процессы с использованием электрооборудования условно можно разделить на три части: первая часть – это работы, связанные непосредственно с эксплуатацией основного или вспомогательного оборудования (электропечи, станки, электроинструменты, сварочные аппараты, электроподвижной состав, электропечи, электрокары и т.п.); вторая часть – работы, связанные с системой электроснабжения предприятий (обслуживание, техническое содержание, ремонт, диагностика, проведе-

ние оперативных переключений и др.); третья группа – это работы, которые не связаны непосредственно с электрооборудованием, но выполняются в зонах воздействия вредных и опасных производственных факторов со стороны электрооборудования и устройств электроснабжения [2-4].

На рисунке 1 представлены данные по распределению несчастных случаев на предприятиях железнодорожного транспорта в зависимости от величины напряжения и рода тока.

Как видно из рисунка 1, большая часть работников энергетических хозяйств предприятий получают электротравмы при величине напряжения 6-10кВ, что характерно для заводских подстанций железнодорожных предприятий, а также при уровне напряжения 220/380В, что соответствует системе питания электрооборудования цехов и производственных участков. В меньшей степени несчастные случаи возникают при величинах напряжений 110кВ, 35 кВ – это связано в основном с удалённым и труднодоступным расположением токоведущих частей линий электропередач и распределительных устройств, а также с более высокой квалификацией обслуживающего персонала.

На рисунке 2 представлена доля (%) от общего числа электротравм на предприятиях транспорта в зависимости от типа электрооборудования.

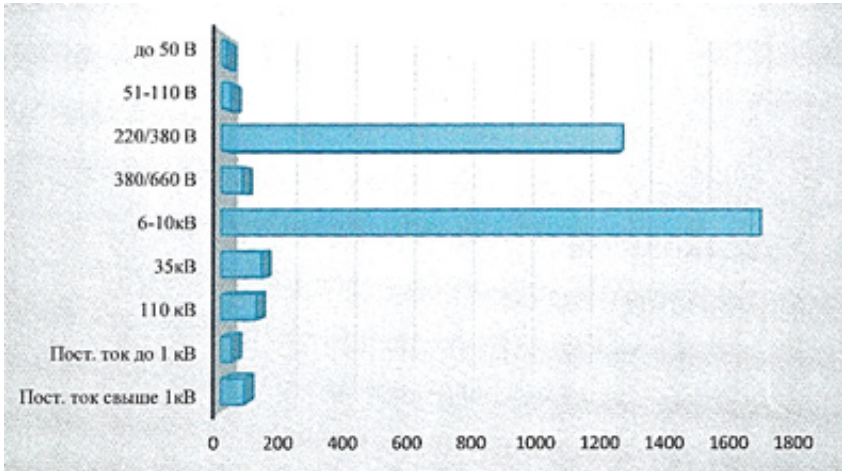



*Рисунок 1 – Распределение несчастных случаев от величины напряжения за период 2018-2023 гг*

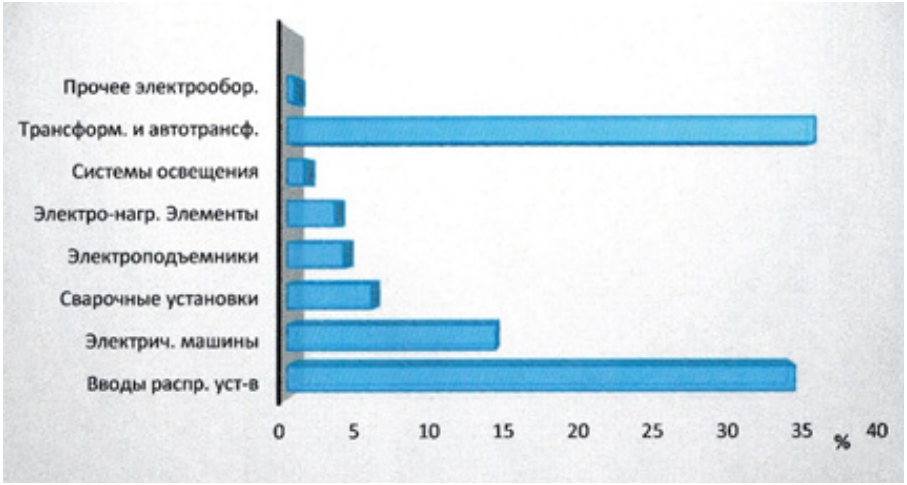



*Рисунок 2 – Распределение числа несчастных случаев в зависимости от типа электрооборудования*

Из рисунка 2 видно, что большую часть электротравм работники ремонтных и эксплуатационных предприятий железнодорожного транспорта получают при эксплуатации и обслуживании трансформаторов (36,2%), вводов распределительных устройств (34,8%), а также при обслуживании и работе с электрическими машинами (14,3%).

Из анализа несчастных случаев очевидно, что электротравматизм в энергетических хозяйствах железнодорожных предприятий остаётся на высоком уровне, больше половины несчастных случаев приходится на выполнение работ с устройствами электроснабжения предприятий. Поэтому вопросы по обеспечению безопасных условий эксплуатации и обслуживания электрооборудования являются актуальными и требуют от руководства предприятий внедрения организационно-технических мероприятий, направленных на предупреждение, выявление и устранение источников опасных и вредных производственных факторов, которые в конечном итоге приводят к производственному травматизму и профессиональным заболеваниям работников

предприятий [5-10].

Хочется отметить, что при возникновении аварий уровень воздействия вредных и опасных производственных факторов во много раз превышает допустимые нормы и повышается риск возникновения несчастных случаев на производстве (рис. 3).

На заводских и тяговых подстанциях электрических железных дорог повреждения основных элементов устройств электроснабжения распределяются следующим образом (рис. 4). Из рисунка 4 видно, что в основном выходят из строя трансформаторы и автотрансформаторы, коммутационное оборудование – 11% и разрядники – 10%, наблюдаются также повреждения и пережоги контактного провода и проводов воздушных линий – 3%. Чаще всего, около 20%, причины аварий устройств электроснабжения связаны с износом электрооборудования и старением изоляции.




*Рисунок 3 – Проявление опасных и вредных производственных факторов при авариях и неисправностях в энергетических хозяйствах предприятий*




*Рисунок 4 – Повреждения основных элементов устройств электроснабжения подстанций*

**Результаты.** С учётом принципов бережливого производства и ресурсосбережения транспортные предприятия стараются продлить срок службы дорогостоящего электрооборудования, которое исчерпало свой ресурс, забывая о текущем контроле, своевременной диагностике и техническом обслуживании силовых трансформаторов [12]. Около 60% силовых трансформаторов заводских и тяговых подстанций превысили срок службы, установленный заводом изготовителем. Парк силовых трансформаторов на многих предприятиях по регламенту проведения периодического осмотра и диагностики требует индивидуального подхода в зависимости от фактического состояния, режима эксплуатации, климатических условий и т.п.

Условия эксплуатации силовых трансформаторов на предприятиях железнодорожного транспорта отличаются от условий эксплуатации трансформаторов промышленных предприятиях.

Силовые трансформаторы тяговых подстанций электрических железных дорог подвержены частым коротким замыканиям, особенно на деповских фидерах, режимы работы характеризуются неравномерностью загруженности фаз, нагрузка носит резкопеременный характер, часто наблюдаются броски токов, особенно большие величины токов короткого замыкания наблюдаются на коротких фидерах. При таких условиях эксплуатации силовые трансформаторы, которые исчерпали свой ресурс, работают на пределе, и существует большая вероятность их выхода из строя и возникновения аварий с непредсказуемыми последствиями. Как правило, аварии высоковольтного оборудования сопровождаются электрической дугой, взрывами маслонаполненных баков, горением обмоток силовых трансформаторов. Чаще всего аварии на электрических подстанциях возникают из-за эксплуатации неисправного высоковольтного оборудования, которое исчерпало свой ресурс.

Релейная защита не в полной мере может обеспечить своевременное отключение аварийного участка, максимальные значения ударных токов короткого замыкания воздействуют на обмотки трансформатора постепенно снижаясь до момента срабатывания релейной защиты. Особенно опасны короткие замыкания, которые возникают на «коротких фидерах». Для своевременного обнаружения повреждения силовых трансформаторов и прогнозирования аварий необходим комплексный подход с использованием современных методов диагностики и текущего контроля основных параметров силовых трансформаторов. Своевременное обнаружение неисправностей даёт возможность исключить вероятность возникновения несчастного случая на производстве.

На транспортном производстве в основном используются следующие методы текущего контроля состояния оборудования [8-16]:

– визуальный контроль – выявление повреждения оборудования по внешним признакам;

– контроль функционирования оборудования. Осуществляется проверка выполнения оборудованием своих функций, без количественной оценки. При возникновении отклонений в работе срабатывает сигнализация или оповещение;

– контроль состояния вспомогательного оборудования;

– диагностический контроль, методы и способы измерения основных параметров силовых трансформаторов и сравнение полученных результатов с нормативными значениями, а также контроль скорости изменения параметров состояния узлов и элементов конструкции силовых трансформаторов;

– профилактический контроль. – Проводят измерение основных параметров оборудования с целью проведения регулировки, замены элементов конструкции или расходных материалов.

В энергетическом хозяйстве предприятия особое внимание уделяется состоянию высоковольтного оборудования, силовых трансформаторов и распределительных устройств, выход из строя которых приводит не только к перебою работы электроснабжения цехов и участков железных дорог, но и к серьёзным авариям.

Рассмотрим в качестве примера методы контроля состояния основного элемента системы электроснабжения – силового трансформатора.

На рисунке 5 представлены методы контроля оборудования силового трансформатора.

Для определения состояния силового трансформатора методы контроля и диагностики высоковольтного оборудования разделяют на группы.

К первой группе относится визуальный осмотр трансформаторного оборудования (трансформаторного бака, расширителя, системы охлаждения, высоковольтных вводов, изоляторов, измерительных приборов и др.), проверка исправности датчиков и сигнализаторов текущего контроля состояния основных параметров трансформатора (газовое реле, термометрический сигнализатор, маслоуказатель, манометры, реле давления, электроизмерительные приборы и т.п.).

Вторая группа включает в себя выполнение работ без отключения и вывода трансформатора в ремонт. Работы включают в себя измерение основных параметров силовых трансформаторов с использованием различных методов диагностики, требующих непосредственного контакта с оборудованием (виброакустическая диагностика обмоток и магнитопровода, химический и газохроматографической анализ масла, измерение уровня частичных разрядов, тепловозный контроль и др.).

Третья группа включает в себя работы, которые производятся при отключении трансформатора. К третьей группе можно отнести диагностические мероприятия по определению основных параметров обмоток, магнитопровода, высоковольтных вводов, крепления и др. В эту группу также входят все виды профилактических испытаний и ревизий основных и вспомогательных элементов конструкции силового трансформатора.

Четвертая группа – это работы по определению основных параметров элементов и узлов силового трансформатора при выводе его из работы в ремонт. Четвертая группа включает в себя полную ревизию и анализ технического состояния элементов конструкции силового трансформатора при демонтаже.

Для определения состояния элементов конструкции силовых трансформаторов предлагается выделить методы контроля, которые рекомендуются проводить для выявления каждого отдельного повреждения.

В таблице 1 представлена система контроля и диагностики силовых трансформаторов. При изменении показателей датчиков необходимо осуществлять следующие виды контроля: расширенный контроль (сокращение сроков периодичности диагностических мероприятий, снижение нагрузки силовых трансформаторов, проведение дополнительных диагностических мероприятий для определения причины изменения основных параметров трансформатора); отключение трансформатора, проведение комплексной проверки основных параметров; вывод силового трансформатора в ремонт, определение причины повреждения элементов конструкций. При проведении диагностики силовых трансформаторов и выявлении изменения основных параметров делается заключение о состоянии элементов конструкции трансформатора. При определении точного «диагноза» состояния силового электрооборудования необходимо совмещать различные методы диагностики, которые дадут полную параметрическую картину состояния оборудования. Для комплексного анализа, обработки и прогнозирования состояния силовых трансформаторов необходимо использовать архитектуру системы на основе машинного обучения [17, 18].




*Рисунок 5 – Методы контроля трансформаторного оборудования*

*Таблица 1 – Система контроля и диагностики силовых трансформаторов*

| Способ контроля | Вид контроля | Средства контроля |
|---|---|---|
| Непрерывный контроль | Контроль состояния | Датчики уровня частичных разрядов; датчики изменения виброактивности обмоток и магнитопровода; датчики изменения магнитного потока; датчики изменения циркуляции и уровня масла |
| | Контроль режима | Термометрический сигнализатор; счётчик коротких замыканий и перенапряжений; газовое реле. |
| Периодический контроль без отключения | Внешний контроль | Хроматографический анализ (1), физико-химический и диэлектрический анализ масла (2), тепловизионный контроль (3). |
| | | Вибродиагностика обмоток, магнитопровода и бака (4); осмотр тбака, расширителя, радиаторов и трансформаторного оборудования; проверка устройства регулирования под нагрузкой (РПН); измерение уровня частичных разрядов (5); проверка показаний контрольно-измерительных приборов, давления масла, системы охлаждения; проверка вспомогательных устройств (маслонасосов, воздухоосушителей и т.п.) |
| Периодический контроль с отключением | Внутренний контроль | измерение сопротивления изоляции обмоток (6); измерение сопротивления контактов (7); |
| | | Измерение сопротивления обмоток на постоянном токе (8); определение потерь и тока холостого хода (9); измерение сопротивления короткого замыкания (10); метод низковольтных импульсов (11); |
| | | Измерение сопротивления короткого замыкания при пониженном напряжении (12) |
| | | Испытание повышенным напряжением (13) |
| | | Определение тангенса угла диэлектрических потерь (14) |
| | | Осмотр при вскрытии трансформатора |

В таблице 2 предложены методы диагностического контроля основных параметров трансформатора в зависимости от вида повреждений. Сочетание различных методов диагностики позволит более точно выявить повреждение элементов конструкции силовых трансформаторов.

*Таблица 2 – Выбор методов диагностики и контроля силовых трансформаторов*

| № | Повреждение элементов конструкции силового трансформатора: основные признаки | Изменение параметров | Диагностические мероприятия |
|---|---|---|---|
| 1 | Магнитопровод<br>ослабление крепления; износ изоляции;<br>дефекты магнитопровода (заусеницы, деформация листов, неоднородность и др.); неправильная сборка или перешихтовка магнитопровода | – местные перегревы;<br>– концентрация влаги в масле;<br>– увеличение потерь холостого хода;<br>– повышенная вибрация; | 1, 2, 4, 5, 14, 15 |
| 2 | Обмотки трансформатора<br>Пробой и повреждение изоляции; ослабление крепления и расспрессовка обмоток;<br>деформация обмоток | – Межвитковые короткие замыкания;<br>– повышенный нагрев;<br>– изменение сопротивления обмоток;<br>– дуговые, искровые, частичные разряды<br>– ослабление и вибрация обмоток. | 1, 2, 4, 6, 8,11,12, 13, 14 |
| 3 | Система охлаждения:<br>износ подшипников; нарушение системы питания; повреждение обмоток двигателя; нарушение работы масляного насоса. | – повышенная вибрация и шум;<br>– повышение температуры трансформаторного масла;<br>– изменение состава масла. | 1, 2, 3, 4 |
| 4 | РПН<br>увлажнение и загрязнение изолирующих деталей;<br>нарушение работы контакторов и переключателей;<br>подгорание контактов. | – искрение;<br>– концентрация примесей в масле;<br>– изменение сопротивления контактов. | 1, 2, 3, 4, 5, 7 |
| 5 | Высоковольтные вводы и изоляторы:<br>увлажнение бумажной основы вводов; сколы;<br>микротрещины, плохой контакт; перекрытие и пробой остова; загрязнение изоляторов. | – нагрев контактных соединений;<br>– поверхностные разряды;<br>– изменение сопротивления изоляции. | 3, 4, 7, 14 |

**Обсуждение.** В работе проведён анализ причин возникновения несчастных случаев на предприятиях железнодорожной отрасли. Анализ показал, что чаще всего несчастные случаи возникают при обслуживании и эксплуатации силовых трансформаторов и автотрансформаторов (36,2%), причём высокая доля несчастных случаев приходится на эксплуатацию и обслуживание неисправного электрооборудования. Представленные данные свидетельствуют о том, что принятые предприятиями документы о продлении срока службы силовых трансформаторов требуют индивидуального подхода к эксплуатации силовых трансформаторов, которые исчерпали свой ресурс. В данном случае для исключения возникновения аварий и несчастных случаев на заводских и тяговых подстанциях необходимо проводить комплексную систему диагностики основных параметров силовых трансформаторов с прогнозированием его состояния. Для этих целей необходимо использовать современные методы мониторинга, хранения и обработки больших данных диагностических испытаний, а также определение остаточного ресурса с использованием нейронных сетей [17-19].

**Выводы.** Всё электрооборудование промышленного и транспортного предприятий является источником опасных и вредных производственных факторов. Практически все виды производственной деятельности работников энергетических хозяйств предприятий непосредственно связаны с воздействием вредных и опасных производственных факторов в виде тока, напряжения, электромагнитного влияния, шума электрических машин и др. Поэтому для обеспечения безопасных условий работы работников энергетических хозяйств предприятий необходим комплексный подход к системе управления предприятием, а также к организации и проведению мониторинга состояния устройств электроснабжения.

Для снижения электротравматизма работников эксплуатационных и ремонтных предприятий железнодорожного транспорта при эксплуатации и обслуживания высоковольтного оборудования необходимо проводить своевременную диагностику электрооборудования согласно принятым регламентам. Совмещение различных методов диагностики по определению общих признаков изменений параметров трансформатора позволяет более точно определить место повреждения силовых трансформаторов не только по факту наличия дефекта, но и спрогнозировать изменение основных параметров силовых трансформаторов. Своевременная диагностика силовых трансформаторов и определение остаточного ресурса помогут предотвратить аварии на производстве и исключить травмы на производстве при эксплуатации и обслуживании неисправных силовых трансформаторов.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Павлов, И.М. Анализ влияния вредных и опасных производственных факторов на здоровье работников железнодорожного транспорта / И.М. Павлов, А.Е. Сарсенов, З.А. Утарова // Наука и образование. – 2022. – № 2-2(67). – С. 214-222. – DOI: 10.56339/2305-9397-2022-2-2-214-222. – EDN: YZVRQK.

2. Статистика несчастных случаев на производстве // Федеральная служба государственной статистики. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.gosnadzor.ru/industrial/equipment/Analysis/index.php (дата обращения 10.07.2023).

3. Разрушение высоковольтных трансформаторов при

взрыве и взаимодействии ударных волн со стенками / Э.Е. Сон, В.С. Бондарь, Ю.М. Темис, Х.Х. Азметов // Теплофизика высоких температур. – 2020. – Т. 58. – № 5. – С. 770-781. – DOI: 10.31857/S0040364420050099. – EDN: UKWHON.

4. Кузнецов, К.Б. Оценка и анализ риска электротравматизма на энергетическом комплексе ОАО "РЖД" / К.Б. Кузнецов, А.А. Пазуха // Безопасность жизнедеятельности глазами молодежи, Челябинск, 25-26 апреля 2019 года / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации; Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Кафедра безопасности жизнедеятельности. Том 1. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2019. – С. 125-131. – EDN: YVLOXP.

5. Определение профессионального риска работников на предприятии электроэнергетики / А.И. Сидоров, А.В. Богданов, Ю.В. Медведева [и др.] // Безопасность труда в промышленности. – 2022. – № 8. – С. 76-81. – DOI 10.24000/0409-2961-2022-8-76-81. – EDN: HJZHRU.

6. Huerta-Rosales, J.R., Granados-Lieberman, D., Garcia-Perez, A., Camarena-Martinez, D., Amezquita-Sanchez, J. P., & Valtierra-Rodriguez, M. (2021). Short-circuited turn fault diagnosis in transformers by using vibration signals, statistical time features, and support vector machines on fpga. Sensors, 21(11). – DOI: 10.3390/s21113598.

7. Son, D., & Han, S. (2022). Development of bus and line control method for short-circuit current reduction using genetic programming. Energies, 15(3). – DOI:10.3390/en15030678.

8. Костюков, А.В. Метрологические аспекты измерения параметров силовых трансформаторов в целях обеспечения их безопасной работы / А.В. Костюков // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 2. – С. 38-43. – EDN: CASYEH.

9. Кузнецов, К.Б. Координатная система контроля и оповещения об опасных электрических потенциалах при эксплуатации и технологии ремонта устройств электроснабжения ОАО "РЖД" / К.Б. Кузнецов, А.А. Пазуха // Известия Транссиба. – 2020. – № 4(44). – С. 37-47. – EDN: UBCNLY.

10. Костюков, А.В. Система мониторинга опасных и вредных производственных факторов в энергетических хозяйствах предприятий машиностроения / А.В. Костюков, А.В. Чернов, А.Н. Чукарин // Вестник РГАТА имени П. А. Соловьева. – 2021. – № 2(57). – С. 30-40. – EDN: RFVORZ.

11. Силовые трансформаторы на энергетических объектах / А.Ю. Хренников, В.В. Вахнина, А.А. Кувшинов, Н.М. Александров. – Москва, Берлин: ООО «Директмедиа Паблишинг», 2021. – 336 с. – ISBN 978-5-4499-2647-0. – EDN: RSQUCU.

12. Обеспечение длительного срока службы силовых трансформаторов и автотрансформаторов 110 кВ и выше электрических сетей / А.В. Майоров, М.Ю. Львов, Ю.Н. Львов [и др.] // Энергетик. – 2019. – № 9. – С. 10-16. – EDN: AUELWY.

13. Ghani, S.A., Khiar, M.S.A., Chairul, I.S., Rahim, N.H., & Kamaruzaini, M.H. (2022). Comparative study of electrical test methods on detecting transformer faults. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, 25(2), 755-762. DOI:10.11591/ijeecs.v25.i2.pp755-762.

14. Rokani, V. Power transformers fault diagnosis using AI techniques / V. Rokani, S.D. Kaminaris // AIP Conference Proceedings, Athens, 25-27 июня 2020 года. – Athens, 2020. – P. 020056. – DOI: 10.1063/5.0032820. – EDN: PDGYHI.

15. Modernization of Diagnostic Methods for Oil Transformers / A.I. Ismoilov, E.D. Karimov, D.A. Sidorov, A.S. Hismatullin // Components of Scientific and Technological Progress. – 2021. – No. 4(58). – P. 5-8. – EDN: QIILCG.

16. Diagnostic System to Monitor the Transformer with the Automated Control System / A.S. Khismatullin, E.V. Sirotina, R.R. Bakirov, Sh.D. Karimov // Components of Scientific and Technological Progress. – 2020. – No. 9(51). – P. 10-13. – EDN: YPELMC.

17. Intelligent Framework and System for Remote Monitoring and Prediction of Power Transformer Conditions / A. Chernov, M. Butakova, O. Kartashov, A. Kostyukov // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2022. – V. 410 LNNS. – P. 321-330. – DOI 10.1007/978-3-030-96196-1_29. – EDN: HTLPAI.

18. Chernov, A. Continuous Monitoring of Work Area Safety at Energy Enterprises by Online Cloud Monitoring and Computer Vision / A. Chernov, M. Butakova, A. Kostyukov // Proceedings – 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2021: 3, Lipetsk, 10-12 ноября 2021 года. – Lipetsk, 2021. – P. 1098-1102. – DOI 10.1109/SUMMA53307.2021.9632155. – EDN: UDKPEP.

19. Behkam, R., Karami, H., Salay Naderi, M., & B. Gharehpetian, G. (2022). Generalized regression neural network application for fault type detection in distribution transformer windings considering statistical indices. COMPEL – the International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 41(1), 381-409. – DOI: 10.1108/COMPEL-06-2021-0199.

***Статья публикуется при поддержке гранта ОАО «РЖД» на развитие научно-педагогических школ в области железнодорожного транспорта.***

*Статья поступила в редакцию 03.05.2024*
*Статья принята к публикации 17.06.2024*

УДК 543.31: 504.453
EDN: UBSCSU

# ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ВОДЫ В РЕКЕ УРАЛ И ЕЕ ПРИТОКАХ НА ТЕРРИТОРИИ ЗАПАДНО-КАЗАХСТАНСКОЙ ОБЛАСТИ

© Авторы 2024

SPIN: 5784-9118
AuthorID: 763271
ORCID: 0000-0002-3220-031X
ResearcherID: ABF-3360-2020
ScopusID: 10041650500

**АТАМАНОВА Ольга Викторовна**, доктор технических наук,
профессор кафедры «Экология и техносферная безопасность»
Институт урбанистики, архитектуры и строительства
*Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.*
*(440054, Россия, Саратов, улица Политехническая, 77, e-mail:O_V_Atamanova@mail.ru)*

SPIN: 7673-8480
AuthorID: 182520
ORCID: 0000-0001-6030-7344
ResearcherID: V-2374-2019
ScopusID: 7006674945

**ТИХОМИРОВА Елена Ивановна**, доктор биологических наук, профессор,
заведующая кафедрой «Экология и техносферная безопасность»
Институт урбанистики, архитектуры и строительства
*Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.*
*(440054, Россия, Саратов, улица Политехническая, 77, e-mail: tichomirova_ei@mail.ru)*

SPIN: 7812-6555
AuthorID: 1236781
ORCID: 0009-0004-5824-2421

**КУРМАШЕВА Гулшат Рахметуллаевна,** аспирант
*Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.*
*(440054, Россия, Саратов, улица Политехническая, 77, e-mail: kurmasheva_gulshat@mail.ru)*

SPIN: 1665-4671
AuthorID: 1237763
ORCID: 0009-0005-8145-960X

**ПРОКАЗОВ Николай Дмитриевич**, магистрант
*Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.*
*(440054, Россия, Саратов, улица Политехническая, 77, e-mail: prokazov.n.d@mail.ru)*

**Аннотация.** Состояние водных ресурсов является важной экологической проблемой в Республике Казахстан. Одной из крупных рек Республики Казахстан является река Урал. По территории Казахстана проходит часть среднего течения и нижнее течение этой реки. Из литературных источников известно, что вода в реке Урал в зоне промышленного освоения загрязнена разными химическими веществами, включая калий, шестивалентный хром, железо и др. Цель исследований – проанализировать гидрохимический состав воды в реке Урал и ее притоках на территории Западно-Казахстанской области и оценить наличие загрязняющих веществ в данном природном водоеме. Для проведения исследований отбор проб воды из реки Урал и ее притоков ежемесячно в течение 2023 г. осуществлялся на глубине 1-го метра от поверхности в 11 пунктах, согласно ГОСТ Р 59024-2020. Химические анализы проводились по 30 показателям методами титриметрии, спектрофотометрии, *ICP ES* в лабораториях учебно-научной базы СГТУ им. Гагарина Ю.А. По результатам лабораторных исследований гидрохимического состава воды в реке Урал было установлено превышение нормативов: мутности воды более, чем в 10 раз; содержания растворенного кислорода в 4-6 раз; $БПК_5$ в отдельных пунктах в 2 раза; магния в 1,5 раз; гидрокрбонатов в отдельных пунктах в 1,5 раз; калия в 1,3-1,4 раза; аммония солевого в 1,2 раза; железа в 7 пунктах в 1,2 раза; свинца в 2-х пунктах в 1,2 раза; фенолов в 1,2-2 раза; общего фосфора более, чем в 10 раз; фосфатов в 1,7-3,1 раза. Проведенные мониторинговые исследования и аналитические расчеты позволили определить удельный комбинаторный индекс загрязненности воды в реке Урал и ее притоках на территории Западно-Казахстанской области, по результатам которого воду можно считать: условно-чистой по кальцию, хлоридам, сульфатам, натрию, азоту нитритному, азоту нитратному, хрому общему, хрому (VI), ХПК, меди, цинку, нефтепродуктам, минерализации, азоту нитритному, азоту нитратному, сухому остатку, частично по гидрокарбонатам, железу общему и $БПК_5$; слабо-загрязненной по калию, магнию, аммонию солевому, фенолам, частично по свинцу; загрязненной по растворенному кислороду; по фосфатам в 3-х пунктах загрязненной и в 8-и пунктах грязной; экстремально-грязной по прозрачности, взвешенным веществам и общему фосфору.

Состояние данного природного водоема требует проведения комплексных мероприятий по очистке и недопущению дальнейшего загрязнения воды в реке, особенно необходим строгий контроль осуществления сбросов в водоем промышленными и сельскохозяйственными предприятиями.

**Ключевые слова**: гидрохимические показатели, лабораторные исследования, состав воды, природный водоем, отбор проб воды, удельный комбинаторный индекс загрязненности воды, сточные воды, вода условно чистая, вода слабо загрязненная, загрязненная вода, грязная вода, экстремально грязная вода.

## HYDROCHEMICAL INDICATORS OF WATER QUALITY IN THE URAL RIVER AND ITS TRIBUTARIES IN THE WEST KAZAKHSTAN REGION TERRITORY

© Authors 2024

**ATAMANOVA Olga Viktorovna**, doctor of technical sciences, professor of «Ecology and Technosphere Safety» department Institute of Urbanism, Architecture and Construction
*Yuri Gagarin State Technical University of Saratov*
*(Politekhnicheskaya st., 77, Saratov, 410054, Russia, e-mail: O_V_Atamanova@mail.ru)*
**TIKHOMIROVA Elena Ivanovna**, doctor of biological sciences, professor, head of «Ecology and Technosphere Safety» department
*Yuri Gagarin State Technical University of Saratov*
*(Politekhnicheskaya st., 77, Saratov, 410054, Russia, e-mail: tichomirova_ei@mail.ru)*
**KURMASHEVA Gulshat Rakhmetullaevna**, post-graduate student
*Yuri Gagarin State Technical University of Saratov*
*(Politekhnicheskaya st., 77, Saratov, 410054, Russia, e-mail: kurmasheva_gulshat@mail.ru)*
**PROKAZOV Nikolay Dmitrievich**, master's student
*Yuri Gagarin State Technical University of Saratov*
*(Politekhnicheskaya st., 77, Saratov, 410054, Russia, e-mail: prokazov.n.d@mail.ru)*

**Abstract**. The state of water resources is an important environmental problem in the Republic of Kazakhstan. The Ural River is one of the major rivers of the Republic of Kazakhstan. Part of the middle and lower reaches of this river flows through the territory of Kazakhstan. It is known from literary sources that the water in the Ural River in the industrial development zone is contaminated with various chemicals, including potassium, hexavalent chromium, iron, etc. The purpose of the research is to analyze the hydrochemical composition of water in the Ural River and its tributaries in the West Kazakhstan region and assess the presence of pollutants in this natural reservoir. Water samples from the Ural River and its tributaries for research were taken monthly during 2023 from a depth of 1 meter at 11 points, in accordance with GOST R 59024-2020. Chemical analyzes were carried out for 30 indicators using titrimetry, spectrophotometry, *ICP ES* methods in the laboratories of the educational and scientific base of the Yuri Gagarin State Technical University of Saratov. Based on the results of laboratory studies of the hydrochemical composition of water in the Ural River, it was established that the following standards were exceeded: water turbidity by more than 10 times; dissolved oxygen content 4-6 times; BOD5 at some points 2 times; magnesium 1.5 times; hydrocarbonates in some areas by 1.5 times; potassium 1.3-1.4 times; ammonium salt 1.2 times; total iron in 7 points 1.2 times; lead in 2 points 1.2 times; phenols 1.2-2 times; total phosphorus more than 10 times; phosphates by 1.7-3.1 times. The monitoring studies and analytical calculations carried out made it possible to determine the specific combinatorial index of water pollution in the Ural River and its tributaries in the West Kazakhstan region. According to the research results, the water in the river can be considered: conditionally clean for calcium, chlorides, sulfates, sodium, nitrite nitrogen, nitrate nitrogen, total chromium, chromium (VI), COD, copper, zinc, petroleum products, mineralization, for nitrite nitrogen, nitrate nitrogen , dry residue, partly for hydrocarbonates, total iron and $BOD_5$; slightly polluted for potassium, magnesium, ammonium salt, phenols, partially with lead; polluted by dissolved oxygen, phosphates in 3 points; dirty for phosphates in 8 points; extremely dirty in terms of transparency, suspended solids and total phosphorus. The condition of this natural reservoir requires comprehensive measures to clean up and prevent further pollution of the water in the river. Strict control over the discharge of wastewater into the river by industrial and agricultural enterprises is especially necessary.

**Key worlds**: hydrochemical indicators, laboratory studies, water composition, natural reservoir, water sampling, specific combinatorial index of water pollution, wastewater, conditionally clean water, slightly polluted water, polluted water, dirty water, extremely dirty water.

***Для цитирования:*** *Атаманова О.В. Гидрохимические показатели качества воды в реке Урал и ее притоках на территории Западно-Казахстанской области / О.В. Атаманова, Е.И. Тихомирова, Г.Р. Курмашева, Н.Д. Проказов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 2(66). – С. 169-174. – EDN: UBSCSU.*

**Введение**. Состояние водных ресурсов является одной из наиболее важных экологических проблем в Республике Казахстан. Доступность и качество воды имеют огромное значение для экономического развития страны и здоровья населения. Однако общая ситуация с водными ресурсами в Казахстане ежегодно

ухудшается, а их загрязнение причиняет серьезный вред окружающей среде [1].

Одной из крупных рек Республики Казахстан является река Урал. Свое начало река Урал берет на территории Российской Федерации в Республике Башкортостан. По территории Казахстана проходит часть среднего течения и нижнее течение реки. В Западно-Казахстанской области размещается нижняя часть среднего течения и верхняя часть нижнего течения реки Урал. По берегам реки Урал и ее притоков (как в Российской Федерации, так и в Республике Казахстан) построено множество больших и малых городов, поселков и деревень. На территории Западно-Казахстанской области на реке Урал расположены такие города, как Уральск, Зачаганск, Аксай, Деркул, Чапаев, Жангала, Таскала, а также более мелкие населенные пункты.

В городах Западно-Казахстанской области развиты: энергетика, машиностроение, пищевая, мукомольно-крупяная и легкая промышленности, а также строительная индустрия [2, 3]. Вода из реки Урал на территории Западно-Казахстанской области используется для водоснабжения населенных пунк-тов и промышленных предприятий, например АО Уральский завод «Зенит», ТОО «Уральский механический завод». Также вода из реки Урал и ее притоков забирается для орошения полей и сельскохозяйственных угодий [4].

Река Урал имеет преимущественно снеговое питание. Речная сеть значительно развита в зоне формирования ее стока. В среднем течении река имеет меньше притоков, наиболее крупные из них – это Илек, Утва, Иртек, Чаган, Кушум. Ниже г. Уральска рек Урал имеет только один приток – мелководную реку Барбастау [4, 5].

В настоящее время состояние открытых природных водоемов, испытывающих антропогенную нагрузку, изучается в большинстве стран мира [6-10]. О наличии высокой степени загрязнения реки Урал химическими веществами, включая калий, шестивалентный хром, железо и другие, неоднократно сообщалось [11, 12]. Также отмечалось, что трансграничный сток загрязнен тяжелыми металлами из-за попадания промышленных, хозяйственно-бытовых и других видов сточных вод в речную систему [13].

Вода в пределах бассейна реки Урал, протекающей в зоне промышленного освоения, содержит повышенные концентрации солей, тяжелых металлов, относится к группе кальциевых гидрокарбонатного класса [14].

Цель исследований – проанализировать гидрохимический состав воды в реке Урал на территории Западно-Казахстанской области и оценить наличие загрязняющих веществ в данном природном водоеме.

**Методология.** В ходе исследования проведен сбор и анализ: литературных данных и отчетов о научно-исследовательских работах по изучению гидрохимического состава бассейна реки Урал и ее притоков, и пояснительные записки к ним.

Отбор проб воды осуществлялся на глубине 1-го метра от поверхности в 11 пунктах, согласно ГОСТ Р 59024-2020 [15]. Химические анализы проводились по 30 показателям методами титриметрии, спектрофотометрии, *ICP ES* в лабораториях учебно-научной базы СГТУ им. Гагарина Ю.А. согласно действующих ГОСТов [16].

Пункты отбора проб воды:

– № 1– река Урал: район «Старый Собор»;

– № 2 – река Урал: район ТЭЦ;

– № 3 – река Чаган (правый приток Урала): район Динамо;

– № 4 – река Чаган: пос. Селекционный;

– № 5 – река Деркул (крупнейший приток реки Чаган): район Завода строительно-монтажного оборудования (СМО);

– № 6 – река Деркул: близ села п. Ростошский;

– № 7 – река Урал, с. Кушум;

– № 8 – река Урал, с. Тайпак;

– № 9 – река Урал, с. Январцево;

– № 10 – река Чаган: близ села п. Чувашинский;

– № 11 – канал Кошимский (русло реки Кушум – рукав реки Урал): с. Кушум.

Отбор проб проводился 1-го числа каждого месяца в течение всего 2023 года.

**Результаты.** Поскольку исследуемая часть трансграничной реки Урал и ее притоков располагается н территории Республики Казахстан, было решено проанализировать состав вод реки на данной территории сравнительной оценкой показателей с ПДК, являющейся нормативом для водных объектов хозяйственно-питьевого водоснабжения и мест культурно-бытового водопользования в Казахстане. Для нормирования качества воды природных водоемов в Республике Казахстан используется Приказ Министра здравоохранения Республики Казахстан от 24 ноября 2022 года № ҚР ДСМ-138 «Об утверждении Гигиенических нормативов показателей безопасности хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования» [17]. Большая часть значений ПДК веществ, приведенных в приложении к этому приказу, аналогична Российским нормативам СанПиН 1.2.3685-21 [18] и СанПиН 2.1.5.980-00 [19]. И только по некоторым показателям ПДК в Казахстанском приказе [17] отличаются от Российских нормативов. В частности, на основании приказа [17] принимается: ПДК сухого остатка 1500 мг/дм$^3$ вместо 1000 мг/дм$^3$ [19]; ПДК железа общего 0,3 мг/дм$^3$ вместо 0,1 мг/дм$^3$ [18]; ПДК сульфатов 250 мг/дм$^3$ вместо 500 мг/дм$^3$ [18]; ПДК свинца 0,03 мг/дм$^3$ вместо 0,01 мг/дм$^3$ [18]; ПДК цинка 1,0 мг/дм$^3$ вместо 5,0 мг/дм$^3$ [18].

Согласно [17] ПДК для исследуемых показателей представлены в таблице 1. В этой же таблице приведены минимальные (*Xmin*) и максимальные (*Xmax*) значения показателей за 12 месяцев 2023 года.

Анализ данных таблицы 1 позволил сопоставить цифровые значения показателей состава воды в реке Урал и ее притоках на территории Западно-Казахстанской области.

*Таблица 1 – Результаты анализа проб воды из реки Урал и ее притоков, и значения ПДК водных объектов хозяйственно-питьевого водоснабжения и мест культурно-бытового водопользования [17]*

| № | Показатель / единицы измерения | Время отбора проб 2023 г. | Минимальное и максимальное значения показателя | № пункта отбора проб экстремальн. показателя | ПДК |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Температура, $^0$C | Январь-декабрь | Xmin 11,8±1,1<br>Xmax 15,4±1,4 | 6<br>8 | Не норм |
| 2 | Прозрачность, см | Январь-декабрь | Xmin **19,0**±2,6*****<br>Xmax **22,0**±2,2***** | 1<br>3 | **2** |
| 3 | Водородный показатель, (pH) | Январь-декабрь | Xmin 7,35±0,72<br>Xmax 8,1±0,7 | 11<br>1 | **6,5-8,5** |
| 4 | Растворенный кислород, мг/дм$^3$ | Январь-декабрь | Xmin **9,76**±0,87***<br>Xmax **13,66** ±1,26*** | 8<br>1 | **4** |
| 5 | Взвешенные вещества, мг/дм$^3$ | Январь-декабрь | Xmin **23**±2,2*****<br>Xmax **29,1** ±2,8***** | 8<br>6 | **0,75** |
| 6 | БПК$_{5,}$ мг/дм$^3$ | Январь-декабрь | Xmin 2,87±0,27<br>Xmax **5,1**±0,5** | 7<br>5 | **3** |
| 7 | ХПК, мг/дм$^3$ | Январь-декабрь | Xmin 7,09±0,69<br>Xmax 10,75 ±1,06 | 9<br>10 | **30** |
| 8 | Кальций, мг/дм$^3$ | Январь-декабрь | Xmin 58,0±5,7<br>Xmax 88,1 ±8,6 | 2<br>6 | **180** |
| 9 | Магний, мг/дм$^3$ | Январь-декабрь | Xmin **25,20** ±2,4*<br>Xmax **36** ±3,4** | 1<br>11 | **20** |
| 10 | Жесткость, мг-экв/дм$^3$ | Январь-декабрь | Xmin 4,1±0,3<br>Xmax 7,3±0,6 | 1<br>6 | **7 (10)** |
| 11 | Гидрокарбонаты, мг/дм$^3$ | Январь-декабрь | Xmin 256 ±23<br>Xmax **671**±65* | 1<br>7 | **30-400** |
| 12 | Хлориды, мг/дм$^3$ | Январь-декабрь | Xmin 226,9 ±21,9<br>Xmax 336,77 ±32,60 | 1<br>6 | **350** |
| 13 | Сульфаты, мг/дм$^3$ | Январь-декабрь | Xmin 51,2 ±4,9<br>Xmax 76,1 ±7,4 | 5<br>7 | **250** |
| 14 | Натрий, мг/дм$^3$ | Январь-декабрь | Xmin 29,1±2,7<br>Xmax 31,5±3,1 | 1<br>11 | **200** |
| 15 | Калий, мг/дм$^3$ | Январь-декабрь | Xmin **40,3** ±3,9*<br>Xmax **43,9** ±4,2* | 4<br>8 | **30** |
| 16 | Минерализация | Январь-декабрь | Xmin 738,8 ±72,8<br>Xmax **1019,819** ±100,032* | 1<br>6 | **1000** |
| 17 | Сухой остаток, мг/дм$^3$ | Январь-декабрь | Xmin 410 ±40<br>Xmax 420 ±41 | 3,4,8,9<br>1,2,5,6,7,10 | **1500** |
| 18 | Аммоний солевой, мг/дм$^3$ | Январь-декабрь | Xmin **0,554** ±0,053<br>Xmax **0,6** ±0,0* | 10<br>2 | **0,5** |
| 19 | Азот нитритный, мг/дм$^3$ | Январь-декабрь | Xmin 0,017 ±0,001<br>Xmax 0,040 ±0,003 | 11<br>4 | **3,3** |
| 20 | Азот нитратный, мг/дм$^3$ | Январь-декабрь | Xmin 4,7±0,3<br>Xmax 6,8±0,5 | 5<br>6 | **45** |
| 21 | Железо общее, мг/дм$^3$ | Январь-декабрь | Xmin 0,24±0,01<br>Xmax **0,40** ±0,01* | 4<br>1 | **0,3** |
| 22 | Хром (VI), мг/дм$^3$ | Январь-декабрь | Xmin 0,0020±0,0001<br>Xmax 0,03 ±0,002 | 1-7<br>10 | **0,05** |
| 23 | Хром общий, мг/дм$^3$ | Январь-декабрь | Xmin 0,0052±0,0005<br>Xmax 0,0102±0,0001 | 7<br>10 | **0,02** |
| 24 | Медь, мг/дм$^3$ | Январь-декабрь | Xmin 0,0003 ±0,0007<br>Xmax 0,005±0,0009 | 1,2<br>7 | **1,0** |
| 25 | Цинк, мг/дм$^3$ | Январь-декабрь | Xmin 0,002±0,0001<br>Xmax 0,01±0,001 | 1<br>3-6 | **1,0** |
| 26 | Свинец, мг/дм$^3$ | Январь-декабрь | Xmin 0,002±0,0006<br>Xmax **0,04**±0,050* | 2<br>10 | **0,03** |
| 27 | Фенолы, мг/дм$^3$ | Январь-декабрь | Xmin **0,00128** ±0,00010<br>Xmax **0,00210** ±0,00002 | 11<br>2 | **0,001** |
| 28 | Нефтепродукты, мг/дм$^3$ | Январь-декабрь | Xmin 0,00227±0,00021<br>Xmax 0,022±0,001 | 1<br>8,9 | **0,1** |
| 29 | Общий фосфор, мг/дм$^3$ | Январь-декабрь | Xmin **0,087**±0,007*****<br>Xmax **1,666** ±0,156***** | 2<br>9 | **0,0001** |
| 30 | Фосфаты, мг/дм$^3$ | Январь-декабрь | Xmin **0,681**±0,067<br>Xmax **1,26**±0,11**** | 2<br>9 | **0,4** |

| | |
|---|---|
| * | Превышение ПДК в 1-2 раза |
| ** | Превышение ПДК более 2-4 раза |
| *** | Превышение ПДК в 4-6 раза |
| **** | Превышение ПДК 6-10 раз |
| ***** | Превышение ПДК более 10 раз |

**Обсуждение**. Проведенные анализы проб воды показали, что содержание таких показателей как: водородный показатель, ХПК, кальций, жесткость, хлориды, сульфаты, натрий, сухой остаток, азот нитритный, азот нитратный, хром (VI), медь, цинк, СПАВ, фенолы, нефтепродукты не превышают ПДК.

Показатель прозрачности (мутности) воды изменялся в течение года от 19 см до 22 см. Высокая мутность имеет серьезные негативные последствия: она минимизирует воздействие ультрафиолетовых лучей на микроорганизмы, исключая их обеззараживание, и способствует размножению бактерий.

Содержание растворенного кислорода колебалось от 9,76 мг/дм$^3$ до 13,66 мг/дм$^3$, что 4-6 раз больше ПДК. Это объясняется тем, что речной поток, движущийся с большей скоростью, в поверхностных слоях всегда содержит значительное количество растворенного кислорода.

Содержание взвешенных веществ составило от 23 мг/дм$^3$ до 29 мг/дм$^3$. Причина повышенного содержания растворенных веществ в речной воде объясняется естественными факторами, такими как состав пород русла реки и уклон топографической поверхности территории.

Значения $БПК_5$ колебались от 2,87 мг/дм$^3$ до 5,1 мг/дм$^3$. Повышение уровня $БПК_5$ означает, что в природной воде присутствует большое количество органических соединений.

Содержание магния в течение года изменялось от 25,20 мг/дм$^3$ до 36 мг/дм$^3$. Магний часто попадает в водоемы из-за вымывания минеральных отложений, таких как доломит и магнезит, а также попадает в природный водоем с недостаточно очищенными промышленными сточными водами.

Содержание гидрокарбонатов колебалось от 256 мг/дм$^3$ до 671 мг/дм$^3$. Повышенное содержание в природной воде гидрокарбонатов можно объяснить растворением углекислого газа из атмосферы, химическим выветриванием и различными биологическими процессами, которые происходят в воде. Кроме того, значительное количество веществ поступает в реку из грунтовых вод и атмосферных осадков.

Содержание калия колебалось от 40,3 мг/дм$^3$ до 43,9 мг/дм$^3$. Поступление ионов калия в природные водоемы чаще всего вызвано выбросами хозяйственно-бытовых отходов, промышленных сточных вод или же вод, используемых для орошения полей.

Значения минерализации колебалось от 738,8 мг/дм$^3$ до 1095,25 мг/дм$^3$. Минерализация речной воды подвержена значительным изменениям, которые обусловлены разновидностью минералов, составляющих водосборы и воздействием антропогенных факторов на поверхностные и грунтовые воды.

Количество аммония солевого колебалось от 0,554 мг/дм$^3$ до 0,6 мг/дм$^3$. Его присутствие в природных водах является результатом разложения и жизнедеятельности разнообразных живых существ. Тем не менее, чаще всего ионы аммония поступают в природные воды со стоками животноводства, агрохозяйства и промышленных предприятий. Большая концентрация аммония встречается в водоемах недалеко от канализационных сооружений, выгребов.

Содержание железа общего изменялось от 0,24 мг/дм$^3$ до 0,4 мг/дм$^3$. Причиной поступления железа в воду рек могут служить процессы выветривания и разрушения горных пород.

Концентрация свинца колебалось от 0,002 мг/дм$^3$ до 0,04 мг/дм$^3$. Соединения свинца поступают в естественные водоемы через выпадения осадков, а также в результате вымывания горных пород и почвы. Однако в загрязнении водных ресурсов основную роль играют сточные воды промышленных предприятий. Использование тетраэтиленсвинца в автомобильном топливе, бытовые отходы, а также сжигании угля вызывает проникновение тяжелых металлов в грунтовые и поверхностные воды. Это особенно свойственно поверхностным водотокам, протекающим по территории промышленных населенных пунктов.

Содержание общего фосфора колебалось от 0,0087 мг/дм$^3$ до 1,666 мг/дм$^3$. Наличие фосфора в водоеме имеет множество причин, в число которых входят отходы некоторых отраслей, хотя большинство его соединений поступает в водоемы из-за сельскохозяйственной и бытовой деятельности людей. Фосфор присутствует в составе минеральных удобрений.

Содержание фосфатов варьировалось от 0,681 мг/дм$^3$ до 1,26 мг/дм$^3$, что вполне может являться свидетельством загрязнения речной воды промышленными стоками, также смывом в реку фосфатных удобрений с посевных полей.

Проведенные мониторинговые исследования и аналитические расчеты позволили определить удельный комбинаторный индекс загрязненности воды (УКИЗВ) в реке Урал и ее притоках на территории Западно-Казахстанской области [20]. В результате, было установлено, что вода исследованных водных объектов имеет следующий уровень загрязнения:

– условно чистой по кальцию, хлоридам, сульфатам, натрию, азоту нитритному, азоту нитратному, хрому общему, хрому (VI), меди, цинку и нефтепродуктам (пробы пунктов № 1-11), гидрокарбонатам (пробы пунктов № 1, 3-6), минерализации (пробы пунктов № 1-4, 7-11), азоту нитритному (пробы пунктов № 1-11), азоту нитратному (пробы пунктов № 1-11), сухому остатку (пробы пунктов № 1-10), свинцу (пробы пунктов № 1-9), железу общему (пробы пунктов № 4-5), ХПК (пробы пунктов № 1-11), $БПК_5$ (пробы пунктов № 1-4, 6-11);

– слабо загрязненной по $БПК_5$ (проба пункта № 5), калию (пробы №1-11), магнию (пробы пунктов № 1-11); гидрокарбонатам (пробы пунктов № 2, 7-11), аммонию солевому (пробы пунктов № 1-11), железу общему (пробы пунктов № 1-4, 6-11), минерализации (пробы пунктов № 5, 6), свинцу (пробы пунктов № 10, 11), фенолам (пробы пунктов № 1-11);

– загрязненной по растворенному кислороду (пробы пунктов № 1-11), фосфатам (пробы пунктов № 2, 4, 6);

– грязной по фосфатам (пробы пунктов № 1, 3, 5, 7-11);

– экстремально грязной по прозрачности (пробы пунктов № 1-11), взвешенным веществам (пробы пунктов № 1-11), общему фосфору (пробы пунктов № 1-11).

**Выводы**. Воды реки Урал, впадая в Каспийское море, вносят свой вклад в его загрязнение. Река Урал и ее притоки уносят с собой большое количество промышленных и сельскохозяйственных отходов, а также сточные воды из расположенных по ее берегам городов. В результате этого качество воды значительно ухудшается.

Одной из основных причин загрязнения вод реки Урал является деятельность промышленных предприятий, сбрасывающих свои сточные воды в этот природный водоем. Здесь находятся крупные предприятия нефтегазовой, химической и металлургической индустрий. Также значительное влияние на качество воды в реке Урал на территории Западно-Казахстанской области оказывает сельское хозяйство, реализуемое на территории Уральского речного бассейна. Все это приводит к накоплению вредных веществ в речной воде и ухудшению экологической ситуации в водоеме.

Указанные факторы отрицательно влияют на биологическое разнообразие. Из-за загрязнения водной среды многие виды рыб и гидробионтов находятся в угнетенном состоянии, что может привести к их исчезновению. Это имеет серьезные последствия для экосистемы в целом и ихтиофауны, в частности, в Западно-Уральском регионе.

Для решения проблемы загрязнения поверхностных вод Уральского речного бассейна необходимо проводить комплексные мероприятия по очистке и недопущению загрязнения воды в реке Урал и ее притоках, в частности контролю осуществления сбросов промышленными и сельскохозяйственными предприятиями.

Поскольку река Урал является трансграничной рекой, важно наладить сотрудничество между государствами, расположенными в бассейне реки Урал, для совместного решения проблемы сохранения этого природного водоема. Только в этом случае можно надеяться на улучшение экологической ситуации в бассейне реки Урал и сохранение ее богатого биологического разнообразия.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Водный кодекс Республики Казахстан от 09.07.2003 года № 481-II ЗРК (с изменениями и дополнениями по состоянию на 01.01.2022 г.). Астана, 2003. – 107 с.

2. Atamanova O.V., Tikhomirova, E.I., Burahta, V.A., Baytlesova, L.I., Dzhubayalieva, A.K. Hydrochemical Monitoring of Water Quality in Natural Water Bodies of the Ural River Basin // Biology Bulletin, 2022. – V. 49. – N. 10. – P. 1821-1826.

3. Атаманова О.В., Тихомирова Е.И., Курмашева Г.Р. Экологический мониторинг поверхностных вод бассейна реки Урал на территории Западно-Казахстанской области Республики Казахстан // Экология речных бассейнов: Труды 11-й Междунар. науч.-практ. конф. / Под общ. ред. проф. Т.А. Трифоновой; Владим. гос. ун-т. им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, 2023. – С. 582-591.

4. Куанышпаев А.С. Искусственное регулирование реки Жайык // IX Международная научная конференция студентов и молодых ученых «Наука и образование – 2014»: сборник трудов. Астана: Евразийский университет имени Гумилева Л. Н., 2014. – С. 4339-4342.

5. Тулемисова Г.Б., Абдинов Р.Ш., Батырбаева Г.У., Кабдрахимова Г.Ж., Мустафина А.Ж. Современное состояние гидрохимического режима рек Урало-Каспийского бассейна // Известия НАН РК. Серия химия и технологии. 2017. – Т. 1. – № 1 (421). – С. 96-100.

6. Tian Y., Yu Ch., Luo K., Zha X., Wu J., Zhang X., Ni R. Hydrochemical characteristics and element contents of natural waters in Tibet, China. Journal of Geographical Sciences, 2015. – V. 25. – I. 6. – P. 669-686.

7. Hou W., Sun S., Wang M., Li X., Zhang N., Xin X., Sun L., Li W., Jia R. Assessing water quality of five typical reservoirs in lower reaches of Yellow River, China: Using a water quality index method. Ecological Indicators, 2016. – V. 61. – P. 309-316.

8. Naidu S.A., Rao G.D., Vardhan K.V., Kumaraswami M., Rao V.R., Ramu K. Impact of natural and anthropogenic disturbances on the benthic ecological quality of the Coastal Waters of Kochi, Southwest Coast of India. International Journal of Environmental Research, 2018. – V. 12. – I. 6. – P. 861-875.

9. Mendes S.A., Gonçalves É.V., Frâncica L.S., Correia L.-B.C., Nicola J.-V.N., Pestana A.-C.Z., da Silva Medeiros F.V., de Souza W.E., Ineu R.P., Peron A.P. Quality of natural waters sur rounding Campo Mourão, State of Paraná, Southern Brazil : Water resources under the influences from urban and agricultural activities. Water, Air, & Soil Pollution, 2020. – V. 231. – I. 8. – 415.

10. Dhaouadi L., Besser H., Karbout N., Wassar F., Alomrane A.R. Assessment of natural re sources in tunisian Oases: Degradation of irrigation water quality and continued overexploitation of groundwater. Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration, 2021. – V. 6. – 36.

11. Тулемисова Г.Б., Абдинов Р.Ш., Кабдрахимова Г.Ж., Жанетов Т.Б. Экологическое состояние реки Урал // Вестник КазНУ. Серия химическая. – 2017. – № 2 (85). – С. 18-24.

12. Байхонова Т.А. Современное экологическое состояние Урало-Каспийского речного бассейна // Известия вузов. – № 5. – 2013. – С. 95-98.

13. Шимшиков Б.Е., Избасарова А.К. Гидрохимическая и токсикологическая характеристика реки Урал в пределах Западно-Казахстанской области // Вестник КазНУ. Серия экологическая. – 2014. – № 2 (41). – С. 163-167.

14. Лешань И.Ю., Хубитдинова А.Ф. Гидрохимические особенности рек бассейна р. Урал // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2016. – №2-4. – С. 11-13.

15. ГОСТ Р 59024-2020 Вода. Общие требования к отбору проб / Москва Российский институт стандартизации, 2022. – 40 с.

16. Порфирьева А.В., Зиятдинова Г.К., Медянцева Э.П. и др. Гидрохимический анализ: учеб.пособие. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2018. – 88 с.

17. Приказ Министра здравоохранения Республики Казахстан от 24 ноября 2022 года № ҚР ДСМ-138 «Об утверждении Гигиенических нормативов показателей безопасности хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования» [Электронный документ]. Астана, 2022. Режим доступа: https://adilet.zan.kz/rus/docs/V2200030713.

18. СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. М., 2021. – 988 с.

19. СанПиН 2.1.5.980-00. 2.1.5. Водоотведение населенных мест, санитарная охрана водных объектов. Гигиенические требования к охране поверхностных вод. Санитарные правила и нормы (с изм. 2014 г.). М., 2015. – 13 с.

20. РД 52.24.643-2002 Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям. Ростов-на-Дону: Росгидромет, 2002. – 55 с.

*Статья поступила в редакцию 02.04.2024*
*Статья принята к публикации 17.06.2024*

УДК 614.844, 52-17; 66.011
EDN: TNLJDZ

# О МОДЕЛИРОВАНИИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПОЖАРОТУШЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦЕПЕЙ МАРКОВА

© Авторы 2024
SPIN: 5721-1570
AuthorID: 181476
ORCID: 0000-0002-2769-0086
Researcher ID: E-2182-2018

**ТАНКЛЕВСКИЙ Леонид Тимофеевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*
(*195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29*)

SPIN:1076-8133
AuthorID: 664653
ORCID: 0000-0003-1561-2483
Researcher ID: K-2087-2018

**ТАРАНЦЕВ Александр Алексеевич**, доктор технических наук, профессор,
заведующий лабораторией «Проблем безопасности транспортных систем»
*Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН*
*(199178, Россия, Санкт-Петербург, 12-я Линия Васильевского Острова, д.13)*

ORCID: 0000-0002-1616-3504
ScopusID: 57212561809
AuthorID: 980446
Researcher ID: GQH-8479-2022

**БАЛАБАНОВ Иван Дмитриевич,** аспирант
*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*
(*195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29*)

**Аннотация.** Целью статьи является исследование вопросов применения марковских цепей с дискретным и непрерывным временем к моделированию вероятностей состояний объекта, защищаемого автоматическими установками пожаротушения. В результате проведённых исследований была показана возможность оценки вероятностей состояний защищаемого объекта с использованием аналитических выражений для марковской цепи с дискретным временем и соответствие этих выражений аналогичным выражениям для марковской цепи с непрерывным временем. Показано соответствие результатов оценок вероятностей состояний объекта, получаемых с использованием обоих видов марковских цепей. Приведены примеры оценки вероятностей состояний объекта, защищаемого автоматической установкой пожаротушения, с использованием марковской цепи с дискретным и непрерывным временем. Показана согласованность получаемых результатов и целесообразность применения относительных величин вероятностей и интенсивностей переходов в марковских цепях. Сделан вывод о возможности получения аналитических выражений для цепей Маркова, применяемых для моделирования широкого класса процессов, в частности, каскадного развития нештатных ситуаций на защищаемых объектах.

**Ключевые слова***:* пожар, марковские цепи, автоматические системы пожаротушения, моделирование, вероятности переходов, интенсивности переходов, вероятности состояний.

# APPLICATION OF MARKOV CHAINS TO THE PROBLEMS OF MAINTAINING THE READINESS OF ORGANIZATIONAL AND TECHNICAL SYSTEMS

© Authors 2024
**TANKLEVSKY Leonid Timofeevich**, doctor of technical sciences, professor, head of the Department
*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*
(*195251, Russia, Saint Petersburg, Politekhnicheskaya str., 29*)

**TARANTSEV Alexander Alekseevich**, doctor of technical sciences, professor,
head of the Laboratory "Problems of Safety of Transport Systems"
*N.S. Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences*
*(199178, Russia, St. Petersburg, 12th Line of Vasilievsky Island, 13)*

**BALABANOV Ivan Dmitrievich,** postgraduate student
*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*
(*195251, Russia, Saint Petersburg, Politekhnicheskaya str., 29*)

**Abstract.** The purpose of the article is to study the application of Markov circuits with discrete and continuous time to modeling the probabilities of states of an object protected by automatic fire extinguishing installations. As a result of the conducted research, it was shown that it is possible to estimate the probabilities of the states of the protected object

using analytical expressions for a Markov chain with discrete time and the correspondence of these expressions to similar expressions for a Markov chain with continuous time. The correspondence of the results of the estimates of the probabilities of the object states obtained using both types of Markov chains is shown. Examples of estimating the probabilities of states of an object protected by an automatic fire extinguishing system using a Markov chain with discrete and continuous time are given. The consistency of the obtained results and the expediency of using relative values of probabilities and intensities of transitions in Markov chains are shown. It is concluded that it is possible to obtain analytical expressions for Markov chains used to model a wide class of processes, in particular, the cascading development of emergency situations at protected facilities.

**Keywords:** fire, Markov chains, automatic fire extinguishing systems, modeling, transition probabilities, transition intensities, probabilities of states

***Для цитирования:*** *Танклевский Л.Т. О моделировании функционирования автоматической системы пожаротушения с использованием цепей Маркова / Л.Т. Танклевский, А.А. Таранцев, И.Д. Балабанов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 2(66). – С. 175-180. – EDN: TNLJDZ.*

**Введение.** Устойчивое развитие экономики на современном этапе предполагает снижение её уязвимости от многих негативных воздействий, в том числе от пожаров, чреватых большими убытками и риском для жизни и здоровья людей [1-6]. В этой связи обеспечению пожарной безопасности [7] в нашей стране уделяется особое внимание. Она обеспечивается соблюдением правил противопожарного режима [8], оборудованием объектов системами противопожарной защиты (СППЗ) [9], эффективными действиями пожарных [10]. При этом важной составляющей СППЗ являются автоматические установки пожаротушения (АУП) [11]).

Как показывает статистика [12], в ряде случаев при возникновении пожара АУП либо не срабатывают (отказ), либо срабатывают, но не выполняют задачу, либо вообще отключены персоналом. К чему это может привести, свидетельствуют пожары, например, [5, 6]. «Обратной стороной» проблемы являются ложные срабатывания АУП [13], также чреватые значительным ущербом – порчей продукции и оборудования огнетушащими веществами, сбоями в технологическом процессе и т.п.

Указанные обстоятельства делают актуальным проведение математического моделирования процессов функционирования АУП, например, с использованием математического аппарата цепей Маркова [14, 15], который хорошо зарекомендовал себя при решении задач, связанных с обеспечением пожарной безопасности [17].

**Методология.** Марковские цепи представляют собой ориентированный граф с $N$ вершинами (по числу состояний $\{S\}=[S_1, ..., S_N]$ исследуемого объекта) и $L$ дугами $\{l_{ij}\}$, соответствующими вероятностям $\{p_{ij}\}$ или интенсивностям $\{\lambda_{ij}\}$ переходов из одного состояния в другое – из $S_i$ в $S_j$ согласно логике переходов. Зная начальные вероятности $[P_1^0, ..., P_N^0]$ состояний $\{S\}$ (очевидно, сумма этих вероятностей =1) и «веса» $\{lij\}$ дуг, становится возможным оценить динамику изменения вероятностей состояний и найти их установившиеся значения $[P_1^c, ..., P_N^c]$. Очевидно, что суммы вероятностей $\sum_{i=1}^{N} P_i^0 = \sum_{i=1}^{N} P_i^c = 1$.

Различают цепи с дискретным и непрерывным временем. В первом случае формируется матрица переходов $P$, образуемая вероятностями переходов $\{p_{ij}\}$. С учётом того, что сумма вероятностей в каждой её строке =1, эта матрица имеет вид:

$$\boldsymbol{P} = \begin{bmatrix} 1-\sum_{i\neq 1}^{N} p_{1i} & p_{12} & \cdots & p_{1N} \\ p_{21} & 1-\sum_{i\neq 2}^{N} p_{2i} & \cdots & p_{2N} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ p_{N1} & p_{N2} & \cdots & 1-\sum_{i\neq N}^{N} p_{Ni} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

С учётом начальных вероятностей $[P_1^0, ..., P_N^0]$ пошагово на каждом $k$-ом шаге рассчитываются вероятности состояний $[P_1^k, ..., P_N^k]$ (очевидно $\sum_{i=1}^{N} P_i^k = 1$: до тех пор, пока их значения не стабилизируются, в результате чего определяется искомый вектор $[P_1^c, ..., P_N^c]$. Порядок пошагового расчёта изложен в монографии [15] и реализован авторами в компьютерной программе *markov.exe.*

Существует и другой способ нахождения вектора $[P_1^c, ..., P_N^c]$ – на основе матрично-векторного произведения ($T$ – символ транспонирования):

$$\begin{bmatrix} P_1^c \\ P_2^c \\ \cdots \\ P_N^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-\sum_{i\neq 1}^{N} p_{1i} & p_{12} & \cdots & p_{1N} \\ p_{21} & 1-\sum_{i\neq 2}^{N} p_{2i} & \cdots & p_{2N} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ p_{N1} & p_{N2} & \cdots & 1-\sum_{i\neq N}^{N} p_{Ni} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \cdots \\ C_N \end{bmatrix}, \quad (2)$$

позволяющего найти вектор:

$C=[C_1 \dots C_N]^{\mathrm{T}}(C_j = \sum_{i=1}^{N} p_{ij} P_i^c,\ j \in [1,N])$

и получить в итоге систему из $N$ алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} 0 = -\sum_{i\neq 1}^{N} p_{1i} P_1^c + p_{21} P_2^c + p_{31} P_3^c + \cdots + p_{N1} P_N^c, \\ 0 = p_{12} P_1^c - \sum_{i\neq 2}^{N} p_{2i} P_2^c + p_{32} P_3^c + \cdots + p_{N2} P_N^c, \\ 0 = p_{13} P_1^c + p_{23} P_2^c - \sum_{i\neq 3}^{N} p_{3i} P_3^c + \cdots + p_{N3} P_N^c, \\ \cdots \\ 0 = p_{1N} P_1^c + p_{2N} P_2^c + p_{3N} P_3^c + \cdots - \sum_{i\neq N}^{N} p_{Ni} P_N^c. \end{cases} \quad (3)$$

Решение системы уравнений (3) позволяет найти искомые установившиеся значения вероятностей состояний $[P_1^c, ..., P_N^c]$ марковской цепи. Следует заметить, что любое из уравнений в (3) может быть заменено на равенство $\sum_{i=1}^{N} P_i^c = 1$.

Однако подход, основанный на марковской цепи с дискретным временем (фактически «времени» как такового нет, есть пошаговое изменение вероятностей состояний), имеет недостатки: а) сложность нахождения и задания вероятностей переходов $\{p_{ij}\}$,

б) трудоёмкость пошаговых расчётов величин $[P_1^k, \ldots, P_N^k]$.

В этой связи А.Н. Колмогоров предложил перейти к марковской цепи с непрерывным временем, которая при известных допущениях [14] позволяет вместо вероятностей $\{p_{ij}\}$ использовать интенсивности $\{\lambda_{ij}\}$ (имеют размерность обратную времени) и перейти к системе из $N$ (по числу состояний $\{S\}$) линейных дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \frac{dP_1}{dt} = f_1(P_1, \ldots, P_N, \{\lambda_{ij}\}), \\ \frac{dP_2}{dt} = f_2(P_1, \ldots, P_N, \{\lambda_{ij}\}), \\ \ldots \\ \frac{dP_N}{dt} = f_N(P_1, \ldots, P_N, \{\lambda_{ij}\}) \end{cases} \quad (4)$$

($f_1, \ldots, f_N$ – функции, зависящие от графа переходов; t – время отсчитываемое от начала процесса). Решение системы уравнений (4) при начальных условиях $[P_1^0, \ldots, P_N^0]$ делает возможным рассчитать динамику вероятностей $[P_1(t), \ldots, P_N(t)]$ состояний цепи. В некоторых случаях возможно получение функций $P_1(t), \ldots, P_N(t)$ в аналитическом виде. Очевидно также: $\sum_{i=1}^{N} P_i(t) = 1$.

Поскольку во многих случаях, как и для ранее рассмотренной цепи с дискретным временем, практический интерес представляют установившиеся значения вероятностей состояний, когда $t \to \infty$, то обнулив левые части в (4), получаем систему из $N$ алгебраических уравнений

$$\begin{cases} 0 = f_1(P_1, \ldots, P_N, \{\lambda_{ij}\}), \\ 0 = f_2(P_1, \ldots, P_N, \{\lambda_{ij}\}), \\ \ldots \\ 0 = f_N(P_1, \ldots, P_N, \{\lambda_{ij}\}), \end{cases} \quad (5)$$

решение которых позволит найти установившиеся значения вероятностей $P_1(\{\lambda_{ij}\})$, …, $P_N(\{\lambda_{ij}\})$ состояний марковской сети. Также $\sum_{i=1}^{N} P_i(\{\lambda_{ij}\}) = 1$.

Знание количественных значений вероятностей установившихся состояний исследуемого объекта позволяет сделать вывод о эффективности его работы, например, может или нет СППЗ объекта обеспечить его безопасное функционирование. В случае, если вывод окажется отрицательным, то какие меры следует предпринять – какие вероятности $\{p_{ij}\}$ или интенсивности $\{\lambda_{ij}\}$ целесообразно снизить или повысить, чтобы получить приемлемые значения установившихся вероятностей $P_1^c, \ldots, P_N^c$.

**Результаты.** Пусть объект, который защищён АУП [11], при штатном режиме работы и в случае пожара может пребывать в семи ($N=7$) состояниях $\{S\}=[S_1, \ldots, S_7]$, которые приведены в таблице 1. Пусть переход из одних состояний в другие может быть описан марковской цепью, представленной в виде графа на рисунке 1. Требуется найти установившиеся вероятности состояний объекта $P_1^c, \ldots, P_7^c$, если в начальный момент он работает в штатном режиме: $P_1^0 = 1, P_2^0 = \cdots = P_7^0 = 0$.

*Таблица 1 – Перечень возможных состояний*

| $\{S\}$ | Состояния | Примечания |
|---|---|---|
| $S_1$ | Функционирование защищаемого объекта в штатном режиме | |
| $S_2$ | Пожар на объекте | |
| $S_3$ | Срабатывание АУП, тушение одним караулом, небольшой ремонт | комплексные состояния |
| $S_4$ | АУП сработала неэффективно, тушение двумя караулами, средний ремонт | |
| $S_5$ | Отказ АУП, тушение по повышенному номеру, проведение АСР, крупный ремонт | |
| $S_6$ | Ложное срабатывание АУП | |
| $S_7$ | Ремонтно-восстановительные работы | |

*АСР – аварийно-спасательные работы*

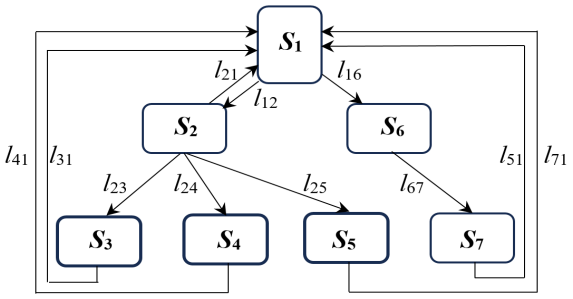



*Рисунок 1 – Граф переходов в марковской цепи*

Сначала рассмотрим возможность решения данной задачи с использованием марковской сети с дискретным временем, когда известны вероятности $\{p_{ij}\}$ 11-и переходов, например (заданы условно): $p_{12}=0{,}01$; $p_{21}=0{,}03$; $p_{23}=0{,}3$; $p_{24}=0{,}2$; $p_{25}=0{,}1$; $p_{16}=0{,}02$; $p_{67}=0{,}4$; $p_{31}=0{,}6$; $p_{41}=0{,}7$; $p_{51}=0{,}8$ и $p_{71}=0{,}5$.

Тогда матрица переходов $P$ принимает вид:

$$\boldsymbol{P} = \begin{bmatrix} 0{,}97 & 0{,}01 & 0 & 0 & 0 & 0{,}02 & 0 \\ 0{,}03 & 0{,}37 & 0{,}3 & 0{,}2 & 0{,}1 & 0 & 0 \\ 0{,}6 & 0 & 0{,}4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0{,}7 & 0 & 0 & 0{,}3 & 0 & 0 & 0 \\ 0{,}8 & 0 & 0 & 0 & 0{,}2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}6 & 0{,}4 \\ 0{,}5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}5 \end{bmatrix}.$$

Решение задачи определения вероятностей $P_1^c, \ldots, P_7^c$ пошаговым методом было получено с использованием компьютерных методов.

Результаты расчётов по программе *markov.exe*, приведенные в таблице на рисунке 2, показали, что процесс стабилизируется уже на 14-м шаге, а установившиеся вероятности будут равны: $P_1^c=0{,}8926$; $P_2^c=0{,}0142$; $P_3^c=0{,}0071$; $P_4^c=0{,}0040$; $P_5^c=0{,}0018$; $P_6^c=0{,}0446$; $P_7^c=0{,}0357$.

| $k$ | $P_1^k$ | $P_2^k$ | $P_3^k$ | $P_4^k$ | $P_5^k$ | $P_6^k$ | $P_7^k$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 1.000 | .0000 | .0000 | .0000 | .0000 | .0000 | .0000 |
| 1 | .9700 | .0100 | .0000 | .0000 | .0000 | .0200 | .0000 |
| 2 | .9412 | .0134 | .0030 | .0020 | .0010 | .0314 | .0080 |
| 3 | .9214 | .0144 | .0052 | .0033 | .0015 | .0377 | .0166 |
| 4 | .9091 | .0145 | .0064 | .0039 | .0017 | .0410 | .0233 |
| 5 | .9019 | .0145 | .0069 | .0041 | .0018 | .0428 | .0281 |
| 6 | .8977 | .0144 | .0071 | .0041 | .0018 | .0437 | .0312 |
| 7 | .8954 | .0143 | .0072 | .0041 | .0018 | .0442 | .0331 |
| 8 | .8941 | .0142 | .0072 | .0041 | .0018 | .0444 | .0342 |
| 9 | .8934 | .0142 | .0071 | .0041 | .0018 | .0445 | .0349 |
| 10 | .8930 | .0142 | .0071 | .0041 | .0018 | .0446 | .0352 |
| 11 | .8928 | .0142 | .0071 | .0041 | .0018 | .0446 | .0355 |
| 12 | .8927 | .0142 | .0071 | .0041 | .0018 | .0446 | .0356 |
| 13 | .8926 | .0142 | .0071 | .0041 | .0018 | .0446 | .0356 |
| 14 | .8926 | .0142 | .0071 | .0040 | .0018 | .0446 | .0357 |
| **15** | **.8926** | **.0142** | **.0071** | **.0040** | **.0018** | **.0446** | **.0357** |

*Рисунок 2 – Динамика вероятностей состояний марковской сети с дискретным временем (жирным шрифтом выделены установившиеся значения $P_1^c$, …, $P_7^c$)*

Вероятности $P_1^c$, …, $P_7^c$ могут быть найдены и другим способом – из системы уравнений (3), которая в данном случае имеет вид:

$$\begin{cases} 0 = -(p_{12}+p_{16})P_1^c + p_{21}P_2^c + p_{31}P_3^c + \\ \qquad +p_{41}P_4^c + p_{51}P_5^c + p_{71}P_7^c, \\ 0 = p_{12}P_1^c - (p_{21}+p_{23})P_2^c, \\ 0 = p_{23}P_2^c - p_{31}P_3^c, \\ 0 = p_{24}P_2^c - p_{41}P_4^c, \\ 0 = p_{25}P_2^c - p_{51}P_5^c, \\ 0 = p_{16}P_1^c - p_{67}P_6^c, \\ 0 = p_{67}P_6^c - p_{71}P_7^c. \end{cases} \quad (6)$$

Подставив в (6) численные значения вероятностей переходов $\{p_{ij}\}$, получаем систему линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} 0 = -0{,}03P_1^c + 0{,}03P_2^c + 0{,}6P_3^c + 0{,}7P_4^c + \\ \qquad +0{,}8P_5^c + 0{,}5P_7^c, \\ 0 = 0{,}01P_1^c - 0{,}33P_2^c, \\ 0 = 0{,}3P_2^c - 0{,}6P_3^c, \\ 0 = 0{,}2P_2^c - 0{,}7P_4^c, \\ 0 = 0{,}1P_2^c - 0{,}8P_5^c, \\ 0 = 0{,}02P_1^c - 0{,}4P_6^c, \\ 0 = 0{,}4P_6^c - 0{,}5P_7^c, \end{cases}$$

откуда находим: $P_1^c=0{,}8926$; $P_2^c=0{,}0142$; $P_3^c=0{,}0071$; $P_4^c=0{,}0040$; $P_5^c=0{,}0018$; $P_6^c=0{,}0446$; $P_7^c=0{,}0357$. Таким образом, полученные двумя способами с использованием марковской цепи с дискретным временем установившиеся вероятности состояний защищаемого объекта совпадают, что подтверждает правильность оценки.

В случае, если определение вероятностей переходов $\{p_{ij}\}$ представляет трудность, можно перейти к соотношениям этих вероятностей, что может позволит вместо прямых оценок $\{p_{ij}\}$ использовать экспертные методы [19]. Применительно к вышерассмотренному примеру можно ввести соотношения: $q_{16}=p_{16}/p_{12}=0{,}02/0{,}01=2$; $q_{21}=p_{21}/p_{12}=0{,}03/0{,}01=3$; $q_{23}=p_{23}/p_{12}=0{,}3/0{,}01=30$; $q_{24}=p_{24}/p_{12}=0{,}2/0{,}01=20$; $q_{25}=p_{25}/p_{12}=0{,}1/0{,}01=10$; $q_{67}=p_{67}/p_{12}=0{,}4/0{,}01=40$; $q_{31}=p_{31}/p_{12}=0{,}6/0{,}01=60$; $q_{41}=p_{41}/p_{12}=0{,}7/0{,}01=70$; $q_{51}=p_{51}/p_{12}=0{,}8/0{,}01=80$; $q_{71}=p_{71}/p_{12}=0{,}5/0{,}01=50$.

Нетрудно проверить, что, заменив в системе уравнений (6) вероятности $\{p_{ij}\}$ на соотношения $\{q_{ij}\}$, получим те же значения вероятностей $P_1^c$, …, $P_7^c$.

Задача оценки вероятностей состояний защищаемого объекта может быть решена с использованием марковской цепи с непрерывным временем. Пусть, как и в предыдущем случае $P_1^0=1$, $P_2^0=\ldots=P_7^0=0$. С учётом графа переходов на рисунке 1 получаем систему линейных дифференциальных уравнений (4) в виде:

$$\begin{cases} \frac{dP_1}{dt} = -(\lambda_{12}+\lambda_{12})P_1 + \lambda_{21}P_2 + \lambda_{31}P_3 + \\ \qquad \lambda_{41}P_4 + \lambda_{51}P_5 + \lambda_{71}P_7, \\ \frac{dP_2}{dt} = \lambda_{12}P_1 - (\lambda_{21}+\lambda_{23})P_2, \\ \frac{dP_3}{dt} = \lambda_{23}P_2 - \lambda_{31}P_3, \\ \frac{dP_4}{dt} = \lambda_{24}P_2 - \lambda_{41}P_4, \\ \frac{dP_5}{dt} = \lambda_{25}P_2 - \lambda_{51}P_5, \\ \frac{dP_6}{dt} = \lambda_{16}P_1 - \lambda_{67}P_6, \\ \frac{dP_7}{dt} = \lambda_{67}P_6 - \lambda_{71}P_7. \end{cases} \quad (7)$$

Решение системы из 7-и линейных дифференциальных уравнений (7) 1-го порядка целесообразно искать численными методами [18], но на практике наиболее интересен установившийся режим, когда $dPi/dt=0$. Тогда левые части в системе дифференциальных уравнений (7) обнуляются, в результате чего она превращается в систему из 7-и алгебраических уравнений (ввиду ограниченности объёма статьи не приводится) вида (5). Как и в предыдущем случае, можно перейти от интенсивностей переходов $\{\lambda_{ij}\}$ к их соотношениям $\{\alpha_{ij}\}$. В результате получаем аналитическое решение системы уравнений (7) для установившегося случая в аналитическом виде:

$$\begin{cases} P_1^c = [1 + \frac{1}{\alpha_{21}+\alpha_{23}+\alpha_{24}+\alpha_{25}}\left(1+\frac{\alpha_{23}}{\alpha_{31}}+\frac{\alpha_{24}}{\alpha_{41}}+\frac{\alpha_{25}}{\alpha_{51}}\right) + \\ \qquad +\frac{\alpha_{16}}{\alpha_{67}}+\frac{\alpha_{16}}{\alpha_{71}}]^{-1}, \\ P_2^c = \frac{1}{\alpha_{21}+\alpha_{23}+\alpha_{24}+\alpha_{25}}P_1^c, \\ P_3^c = \frac{\alpha_{23}}{\alpha_{31}}\cdot\frac{1}{\alpha_{21}+\alpha_{23}+\alpha_{24}+\alpha_{25}}P_1^c, \\ P_4^c = \frac{\alpha_{24}}{\alpha_{41}}\cdot\frac{1}{\alpha_{21}+\alpha_{23}+\alpha_{24}+\alpha_{25}}P_1^c, \\ P_5^c = \frac{\alpha_{25}}{\alpha_{51}}\cdot\frac{1}{\alpha_{21}+\alpha_{23}+\alpha_{24}+\alpha_{25}}P_1^c, \\ P_6^c = \frac{\alpha_{16}}{\alpha_{67}}P_1^c, \\ P_7^c = \frac{\alpha_{16}}{\alpha_{71}}P_1^c, \end{cases} \quad (8)$$

где $\{\alpha_{ij}\}=\{\lambda_{ij}\}/\lambda_{12}$ – относительные интенсивности.

Проиллюстрируем на примере получение количественных значений вероятностей $P_1^c$, …, $P_7^c$. Пусть заданы интенсивности $\{\lambda_{ij}\}$ переходов (значения условные): $\lambda_{12}=0{,}01$; $\lambda_{21}=0{,}03$; $\lambda_{23}=0{,}3$; $\lambda_{24}=0{,}2$; $\lambda_{25}=0{,}1$; $\lambda_{16}=0{,}02$; $\lambda_{67}=0{,}4$; $\lambda_{31}=0{,}6$; $\lambda_{41}=0{,}7$; $\lambda_{51}=0{,}8$ и $\lambda_{71}=0{,}5$.

Тогда переходим к относительным интенсивностям $\alpha_{16}=\lambda_{16}/\lambda_{12}=0,02/0,01=2;$ $\alpha_{21}=\lambda_{21}/\lambda_{12}=0,03/0,01=3;$ $\alpha_{23}=\lambda_{23}/\lambda_{12}=0,3/0,01=30;$ $\alpha_{24}=\lambda_{24}/\lambda_{12}=0,2/0,01=20;$ $\alpha_{25}=\lambda_{25}/\lambda_{12}=0,1/0,01=10;$ $\alpha_{67}=\lambda_{67}/\lambda_{12}=0,4/0,01=40;$ $\alpha_{31}=\lambda_{31}/\lambda_{12}=0,6/0,01=60;$ $\alpha_{41}=\lambda_{41}/\lambda_{12}=0,7/0,01=70;$ $\alpha_{51}=\lambda_{51}/\lambda_{12}=0,8/0,01=80;$ $\alpha_{71}=\lambda_{71}/\lambda_{12}=0,5/0,01=50$ и из (8) находим:

$$\begin{cases} P_1^c = \left[1+\frac{1}{3+30+20+10}\left(1+\frac{30}{60}+\frac{20}{70}+\frac{10}{80}\right)+\frac{2}{40}+\frac{2}{50}\right]^{-1} = \\ \quad = 0,8926, \\ P_2^c = \frac{1}{3+30+20+10}\cdot 0,8926 = 0,0142, \\ P_3^c = \frac{30}{60}\cdot\frac{1}{3+30+20+10}\cdot 0,8926 = 0,0071, \\ P_4^c = \frac{20}{70}\cdot\frac{1}{3+30+20+10}\cdot 0,8926 = 0,0040, \\ P_5^c = \frac{10}{80}\cdot\frac{1}{3+30+20+10}\cdot 0,8926 = 0,0018, \\ P_6^c = \frac{2}{40}\cdot 0,8926 = 0,0446, \\ P_7^c = \frac{2}{50}\cdot 0,8926 = 0,0357. \end{cases}$$

В итоге получаем количественные значения установившихся вероятностей состояний защищаемого объекта: $P_1^c=0,8926;$ $P_2^c=0,0142;$ $P_3^c=0,0071;$ $P_4^c=0,0040;$ $P_5^c=0,0018;$ $P_6^c=0,0446;$ $P_7^c=0,0357.$ Следует отметать, что замена от интенсивностей переходов $\{\lambda_{ij}\}$ на их отношения $\{\alpha_{ij}\}$ широко используется в теории массового обслуживания [15, 16], а отношения $\{\alpha_{ij}\}$ именуются приведенными нагрузками. Из полученных результатов следует, что и марковская цепь с непрерывным временем позволяет оценить вероятности состояний объекта.

**Обсуждение.** Таким образом, показана возможность оценки вероятностей состояний исследуемого объекта (в данном случае – объекта, защищаемого АУП) с использованием марковских цепей с дискретным и непрерывным временем. Причём оба вида цепей при одинаковых (или пропорционально отличающихся) исходных данных позволяют получить и одинаковые результаты. Применительно к цепям с дискретным временем получены аналитические зависимости между вероятностями переходов $\{p_{ij}\}$ и вероятностями состояний $P_1^c, \ldots, P_N^c$ – выражения (3), (6). Также следует отметить схожесть правых частей систем уравнений (6) и (7), что подтверждает общность марковских цепей с дискретным и непрерывным временем.

Из анализа обеих видов цепей можно сформулировать рекомендации, какие вероятности переходов $\{p_{ij}\}$ (или интенсивности $\{\lambda_{ij}\}$) следует уменьшать или увеличивать для обеспечения повышения или стабилизации вероятности $P_1$ функционирования защищаемого объекта в штатном режиме. Например, применительно к приведенным примерам для повышения вероятности $P_1$ необходимо снижать вероятности $p_{12}$ и $p_{16}$ (или интенсивности $\lambda_{12}$ и $\lambda_{16}$) и увеличивать вероятности $p_{31}$, $p_{41}$, $p_{51}$ и $p_{71}$ (или интенсивности $\lambda_{31}$, $\lambda_{41}$, $\lambda_{51}$ *и* $\lambda_{71}$).

Кроме того, для марковских цепей с непрерывным временем показана возможность замены интенсивностей переходов $\{\lambda_{ij}\}$ на их отношения $\{\alpha_{ij}\}$, что позволяет упростить получение исходных данных и соответствует подходу, используемому в теории массового обслуживания.

**Выводы.** В статье приведён один из эффективных подходов к моделированию состояний объекта, защищаемого АУП, с использованием математического аппарата марковских цепей с дискретным и непрерывным временем. Показана схожесть результатов оценок установившихся вероятностей состояний объекта, полученных цепями с дискретным и непрерывным временем, а также возможность замены вероятностей и интенсивностей переходов на соответствующие соотношения. Особое внимание уделено аналитическим методам нахождения установившихся вероятностей состояний объекта. Теоретические положения проиллюстрированы конкретными примерами.

В дальнейшем представляется целесообразным развивать рассмотренный подход в части моделирования каскадного развития нештатных ситуаций (пожаров и ЧС) на защищаемых объектах.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Крупные пожары на промышленных предприятиях в России в 2022-2023 годах – РИА Новости, 08.08.2023 (ria.ru) https://ria.ru/20230527/pozhary-1874596846.html.

2. Крупные пожары на складах в России в 2023 году – РИА Новости, 21.08.2023 (ria.ru) https://ria.ru/20230419/pozhary-1866340865.html.

3. Пожар на ЛПДС «Конда» (p-con.ru). https://p-con.ru/mediabiblioteka/novosti-i-stati/krupnejshij-pozhar-na-predpriyatii-tek-rossii/?ysclid=ltzqzmep4l439705693

4. МЧС сообщило о ликвидации крупного пожара на промышленном объекте в Новгородской области – Газета.Ru. Новости (gazeta.ru): https://www.gazeta.ru/social/news/2023/07/04/20808650.shtml?ysclid=ltzr0xrna2963055007.

5. Подробности крупного пожара на петербургском складе Wildberries (kommersant.ru). https://www.kommersant.ru/doc/6453089?ysclid=lsaegheayb185397218.

6. Крупные пожары в торговых центрах в России в 2017-2022 годах - РИА Новости, 12.12.2022 (ria.ru). https://ria.ru/20221209/pozhary-1837404052.html?ysclid=lsaehu4v41128260205.

7. Федеральный закон от 21.12.1994 № 69-ФЗ (ред. от 29.12.2022) "О пожарной безопасности".

8. Постановление Правительства РФ от 16.09.2020 № 1479 (ред. от 24.10.2022) "Об утверждении Правил противопожарного режима в Российской Федерации".

9. Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ (ред. от 25.12.2023) "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности" (глава 14).

10. Приказ МЧС России от 16 октября 2017 г. № 444 "Об утверждении Боевого устава подразделений пожарной охраны, определяющего порядок организации тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ" (с изменениями и дополнениями).

11. СП 486.1311500.2020. Системы противопожарной защиты. Перечень зданий, сооружений, помещений и оборудования, подлежащих защите автоматическими установками пожаротушения и системами пожарной сигнализации. Требования пожарной безопасности.

12. Пожары и пожарная безопасность в 2021 году: статист. сб. Балашиха: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2022. – 114 с.

13. Причины ложного срабатывания автоматической системы противопожарной защиты (ardexpert.ru). https://ardexpert.ru/article/14871?ysclid=lsaezxlza9939052648.

14. Кемени Д., Снелл Д. Конечные цепи Маркова. М.: Наука, 1970. – 271 с.

15. Вентцель Е.С. Исследование операций. М.: Советское радио, 1972. – 552 с.

16. Таранцев А.А. Инженерные методы теории массового обслуживания. Монография. Изд. 2-е, перераб. и доп. – СПб.:

Наука, 2007. – 175 с.

17. Таранцев А.А., Маринов М.Л., Коновалов И.Н. О способе моделирования пожаровзрывоопасных ситуаций на паромах и плавучих автостоянках с использованием цепей Маркова // Морские интеллектуальные технологии. 2024. – № 1 часть 1. – С. 270-275. – DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.03.

18. Хеммниг Р.В. Численные методы для научных работников и инженеров. Изд. 2-е, испр. М.: Наука, 1972. – 400 с.

19. Орлов А.И. Организационно-экономическое моделирование: учебник в 3-х ч. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2009. Ч.2: Экспертные оценки. – 2011. – 486 с.

*Статья поступила в редакцию 20.03.2024*
*Статья принята к публикации 17.06.2024*

УДК 66.021.4
EDN: DWKGGU

# ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В КОЖУХОТРУБНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКАХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЗАПАСЕННОГО ХЛАДАГЕНТА

© Автор(ы) 2024
SPIN: 7646-2860
AuthorID: 599599
ORCID: 0000-0002-0955-0282
ResearcherID: ABF-2690-2020
ScopusID: 54895938700

**ПАНФИЛОВ Иван Александрович**, кандидат физико-математических наук,
исполняющий обязанности заведующего кафедры «Теоретическая и прикладная механика», докторант
*Донской государственный технический университет*
*(344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, e-mail: panfilov.i@gs.donstu.ru)*

**Аннотация.** Одной из важных технических задач при проведении испытаний в промышленных газопроводах является подготовка потока до эталонного состояния, в частности, охлаждение газа с использованием теплообменного оборудования до заданного значения, необходимого для проведения калибровочных испытаний. При этом к теплообменному оборудованию применяются особые требования по времени срабатывания. Данной работа посвящена исследованию принципиально новой схемы теплообмена в промышленных кожухотрубных теплообменниках при использовании в качестве хладагента жидкости, предварительно охлажденной и запасенной. Данный подход не требует применения охлаждающих чиллеров непосредственно в процессе функционирования системы, и может применяться для получения более стабильных температур охлаждаемой среды, а также в аварийных ситуациях. Разработаны две принципиально разные схемы функционирования и управления данной системой теплообмена для сохранения постоянных параметров охлаждаемой среды. Для каждой схемы на основе дифференциальных уравнений теплопередачи получены управляющие уравнения для нахождения температур и расходов. Для сравнения и верификации аналитические результаты, полученные на основе разработанного подхода, сравнивались с численными расчетами, выполненными методами компьютерной гидродинамики в *Ansys CFD* на основе трехмерных уравнений Навье-Стокса.

**Ключевые слова:** теплообменник, компьютерная гидродинамика, *Ansys CFD*, уравнения теплопередачи, уравнения теплового баланса, уравнений Навье-Стокса.

# STUDY OF HEAT TRANSFER IN SHELL-AND-TUBE HEAT EXCHANGERS USING STORED REFRIGERANT

© The Author(s) 2024
**PANFILOV Ivan Alexandrovich**, candidate of physical and mathematical sciences,
acting head of the Department of Theoretical and Applied Mechanics
*Don State Technical University*
*(344003, Rostov-on-Don, Gagarina Pl., 1, e-mail: panfilov.i@gs.donstu.ru)*

**Abstract**. One of the important technical tasks in carrying out tests in industrial gas pipelines is to prepare the flow to a reference state, in particular, to cool the gas using heat-exchange equipment to a given value required for calibration tests. At the same time, special requirements on response time are applied to the heat exchange equipment. This work is devoted to the investigation of a fundamentally new scheme of heat exchange in industrial shell-and-tube heat exchangers when using pre-cooled and stocked liquid as a refrigerant. This approach does not require the use of cooling chillers directly during system operation, and can be used to obtain more stable temperatures of the cooled medium, as well as in emergency situations. Two fundamentally different schemes of operation and control of this heat exchange system are developed to maintain constant parameters of the cooled medium. For each scheme on the basis of differential equations of heat transfer the control equations for finding temperatures and flow rates are obtained. For comparison and verification, the analytical results obtained on the basis of the developed approach were compared with numerical calculations performed by computational fluid dynamics methods in *Ansys CFD* on the basis of three-dimensional Navier-Stokes equations.

**Keywords:** heat exchanger, computational fluid dynamics, *Ansys CFD*, heat transfer equations, heat balance equations, Navier-Stokes equations.

***Для цитирования:*** *Панфилов И.А. Исследование теплообмена в кожухотрубных теплообменниках с применением запасенного хладагента / И.А. Панфилов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 2(66). – С. 181-188. – EDN: DWKGGU.*

**Введение.** Теплообменные аппараты применяются во многих отраслях промышленности, машиностроения и электроники для теплообмена между двумя средами, имеющими разную температуру [1-3]. Наиболее распространенными являются рекуперативные теплообменники, в которых движущиеся теплоносители разделены стенкой и не контактируют между собой [4-6]. На сегодняшний момент актуально задачей остается повышение эффективности и безопасности теплообменных процессов, а также разработка новых видов теплообменников [7-16].

Одной из важных технических задач при проведении испытаний в промышленных газопроводах является подготовка потока до эталонного состояния, в частности, охлаждение газа до заданного значения, необходимого для проведения калибровочных испытаний. Для данного процесса применяются как правило кожухотрубные теплообменники [17-20], в которых в качестве хладагента используется вода с необходимым количеством гликоля.

Самая простая схема для приведенного выше процесса выглядит в виде чиллера [21-23], который охлаждает хладагент, теплообменника, а также источника питания для чиллера. Балансовое уравнение [24-27] для случая стационарного во времени процесса выглядит следующим образом:

$$Q = v_w \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot (T_1^w - T_2^w) = \\ = v_g \cdot \rho_g \cdot c_g \cdot (T_1^g - T_2^g) = k \cdot F \cdot \Delta T_{\text{ср}} \quad (1)$$

Здесь индексы $w$ и $g$ обозначают воду (хладагент) и газ соответственно, $v$ – объемный расход сред, $c$ – теплоемкость, $T_1$, $T_2$ – температуры на входах и выходах, $k$ – коэффициент теплопередачи для теплообменника, $F$ – площадь теплообменника, $\Delta T_{ср}$ – средний тепловой напор теплообменника.

В случае больших расходов хладагента поддержание чиллером постоянных температур, в том числе минимизация скоростей достижения необходимых температур, является достаточно сложной технической задачей. Альтернативой является использование предварительно охлажденного и запасённого в емкости хладагента.

В данной работе предложена принципиальная схема процесса охлаждения среды (газа) на рисунке 1:

1. Большой бак: емкость «аккумулятор», в которой находится предварительно охлаждённый хладагент.
2. Промежуточный бак: основное назначение – перемешивание жидкостей разной температуры (нагретой от теплообменника и охлажденной от большого бака).
3. Основной теплообменник: охлаждение газа, теплообмен между газом и хладагентом.

Обозначения переменных приведены в таблице 1.

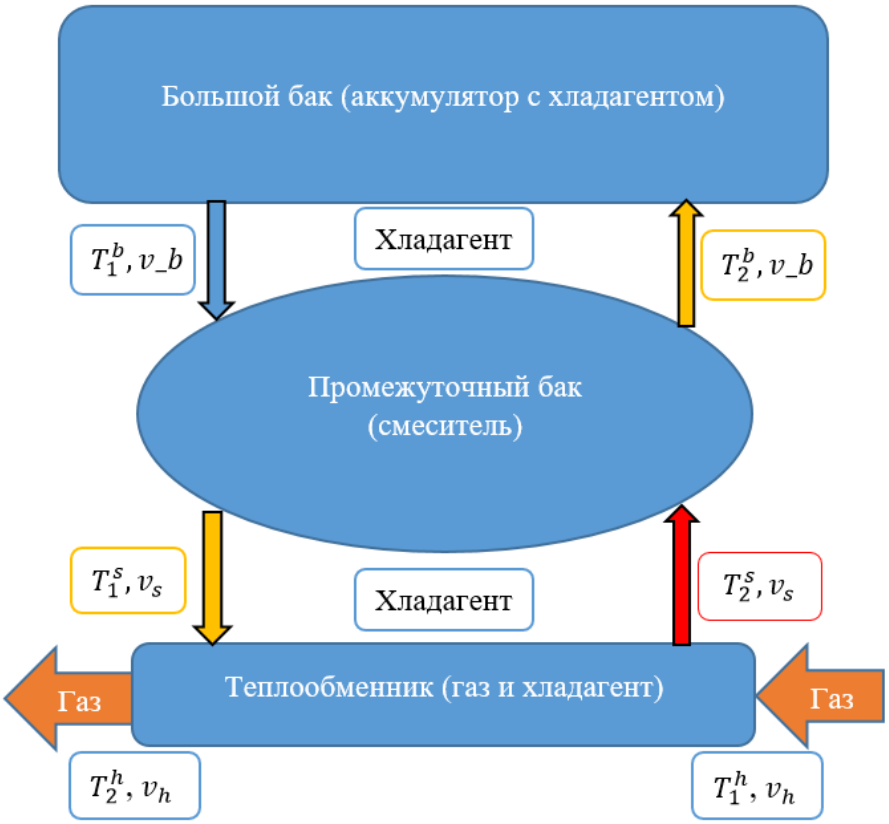



*Рисунок 1 – Общая схема процесса теплообмена*

*Таблица 1 – Обозначения переменных процесса теплообмена*

| № | Обозначение | Название | Среда |
|---|---|---|---|
| 1 | $T_1^h$ | Температура входа газа в теплообменник | Природный газ |
| 2 | $T_2^h$ | Температура выхода газа из теплообменника | |
| 3 | $T_1^s$ | Температура входа хладагента из промежуточного бака в теплообменник | Хладагент |
| 4 | $T_2^s$ | Температура возврата хладагента из теплообменника в промежуточный бак | |
| 5 | $T_1^b$ | Температура входа хладагента из большого бака в промежуточный бак | |
| 6 | $T_2^b = T_1^s$ | Температура возврата хладагента из промежуточного бака в большой бак. | |
| 7 | $v_h$ | Объемный расход газа | Природный газ |
| 8 | $v_s$ | Объемный расход хладагента между промежуточным баком и теплообменником | Хладагент |
| 9 | $v_b$ | Объемный расход хладагента между большим баком и промежуточным баком | |
| 11 | $T_0^b$ | Начальная температура большого бака | Хладагент |
| 12 | $T_{max}^b$ | Максимальная температура нагрева большого бака | Хладагент |
| 14 | $V_b$ | Объем большого бака | Хладагент |
| 15 | $V_s$ | Объем среднего бака | Хладагент |

В данной работе представлены основные балансовые уравнения для определения мгновенных расходных и температурных характеристик, а также определяющие дифференциальные уравнения для решения полной нестационарной задачи. Проводятся исследования двух различных способов функционирования данной схемы теплообмена.

В качестве верификации результаты, полученные на основе данного исследования, сравнивались с численными результатами, полученными методами компьютерной гидродинамики в *Ansys CFD.*

**Методология.** Балансовые уравнения [24-27] для данной схемы теплообмена представляются в следующем виде:

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q4. \quad (2)$$

где $Q_1 - Q_3$ величины потоков среды хладагента и газа, а $Q_4 -$ величина теплопередачи внутри основного теплообменника:

$$Q_1 = v_b \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot (T_2^b - T_1^b), \quad (3)$$

$$Q_2 = v_s \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot (T_2^s - T_1^s), \quad (4)$$

$$Q_3 = v_h \cdot \rho_g \cdot c_g \cdot (T_1^h - T_2^h), \quad (5)$$

$$Q_4 = k \cdot F \cdot \Delta T_{\text{ср}}. \quad (6)$$

В формуле (6) $\Delta T_{cp}$ средний тепловой напор, $k$ – коэффициент теплопередачи, $F$ – площадь теплообмена. Для вычисления среднего теплового напора можно воспользоваться формулами (7) и (8) [1-5]. Выбор формул для конкретных параметров обусловлен схемой функционирования хладагента в основном теплообменнике (прямая или обратная схема).

$$\Delta T_{\text{ср}} = \frac{(T_2^h - T_1^s) - (T_1^h - T_2^s)}{2.3 \cdot Lg\left(\frac{T_2^h - T_1^s}{T_1^h - T_2^s}\right)}, \quad (7)$$

$$\Delta T_{\text{ср}} = (T_1^h + T_2^h)/2 \ + (T_1^s + T_2^s)/2. \quad (8)$$

Таким образом, система балансовых уравнений и уравнения теплопередачи позволяет установить связь только между мгновенными характеристиками процесса теплообмена в заданный момент времени. В общем случае все переменные процесса, представление в задаче (табл. 1) зависят от времени.

Для получения зависимостей величин от времени при заданных начальных условиях в данной работе была получена система дифференциальных уравнений (9)-(13):

$$V_b \frac{dT^b}{dt} = v_b(T_2^b - T_1^b) - \frac{Q_0}{\rho_w c_w}, \quad (9)$$

$$T^b = T_1^b, \quad (10)$$

$$V_s \frac{dT^s}{dt} = -v_b(T_2^b - T_1^b) + v_s(T_2^s - T_1^s), \quad (11)$$

$$T^s = T_1^s, \quad (12)$$

$$v_s \rho_w c_w (T_2^s - T_1^s) = v_h \rho_g c_g (T_1^h - T_2^h), \quad (13)$$

Здесь $Q_0$ – дополнительная мощность охлаждения большой емкости при наличии, например, дополнительных чиллеров для охлаждения.

Система уравнений (9)-(13) совместно начальными условиями при $t=0$ и уравнением теплопередачи (6) представляет из себя полную замкнутую систему для решения нестационарной задачи теплообмена.

**Результаты.** Для того, чтобы не учитывать начальную температуру среднего бака, необходимо положить объем среднего бака намного меньше объема большого бака: $V_s << V_b$. В таком случае уравнение (11) можно не учитывать, средний бак будет работать как мгновенный смеситель хладагента разных температур. Объем $V_s$ для конкретных задач необходимо вычислять исходя из параметров задачи, а также предельных давлений, которые может

выдержать данная емкость.

Варианты функционирования системы теплообмена. Далее рассматриваются два способа работы и регулирования системы теплообмена:

*Вариант 1.* Необходимо сохранить установленные параметры теплообмена газа постоянными. Из возможностей регулирования доступно регулирование только расхода хладагента между большой бочкой и промежуточной $v_b$.

В этом случае все переменные процесса являются постоянными, кроме расхода $v_b$ и температуры большого бака $T_1^b$. Данные параметры соответственно возрастают от времени, определяющие соотношения для них исходя из (9)-(13) записываются следующим образом:

$$T(t) = T_1^b(t) = \frac{v_b|_{t=0}}{V_b}(T_2^b|_{t=0} - T_1^b|_{t=0}) \cdot t - \frac{Q_0}{V_b c_w \rho_w} t + T_0^b, \quad (14)$$

$$v_b(t) = \frac{Q}{\rho_w \cdot c_w \cdot \left(T_2^b - T_1^b(t)\right)}. \quad (15)$$

Здесь для значения $Q$ можно использовать любую из формул для теплового баланса (3)-(5) в начальный момент времени.

*Вариант 2.* Необходимо сохранить установленные параметры теплообмена газа постоянными. Регулируем только расход хладагента между промежуточной бочкой и теплообменником $v_s$.

В этом случае переменные температуры $T_1^b$, $T_2^b$ ($= T_1^s$), $T_1^s$, $T_2^s$ и расход $v_s$ возрастают от времени, остальные переменные остаются постоянными.

Температуры $T_1^b$, $T_2^b$ ($= T_1^s$) вычисляются от времени по формулам:

$$T(t) = T_1^b(t) = \frac{v_b|_{t=0}}{V_b}(T_2^b|_{t=0} - T_1^b|_{t=0}) \cdot t + T_0^b, \quad (16)$$

$$T_2^b(t) = T_1^s(t) = T_1^b(t) + (T_2^b|_{t=0} - T_1^b|_{t=0}) \quad (17)$$

Расход $v_s$ и температура $T_2^s$ вычисляется из двух уравнений:

$$Q = k(v_s, T_1^s, T_2^s) \cdot F \cdot \Delta T_{\text{ср}}, \quad (18)$$

$$Q = v_s \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot (T_2^s - T_1^s), \quad (19)$$

где для значения $Q$ можно использовать любую из формул для теплового баланса (3)-(5) в начальный момент времени.

Как видно из определяющих уравнений для данного способа работы системы теплообмена нам необходимо знать характеристики теплообменника от температуры и расходов хладагента.

**Обсуждение.** Для верификации и сравнения аналитических расчетов для варианта 1 функционирования системы теплообмена (при регулировании расхода между большим и средним баком) в данной работе проводилось сравнение с численным экспериментом для параметров, указанных в таблице 2.

*Таблица 2 – Значения параметров для численного эксперимента*

| № | Параметр | Наименование параметра, размерность | Среда | Значение |
|---|---|---|---|---|
| 1 | $T_1^h$ | Температура входа газа в теплообменник, °C | Природный газ | 23 |
| 2 | $T_2^h$ | Температура выхода газа из теплообменника, °C | Природный газ | 20 |
| 3 | $T_1^s$ | Температура входа хладагента из промежуточного бака в теплообменник, °C | Хладагент | 8 |
| 4 | $T_2^s$ | Температура возврата хладагента из теплообменника в промежуточный бак, °C | Хладагент | 18 |
| 5 | $v_h$ | Расход газа, $м^3/ч$ | Природный газ | 25000 |
| 6 | P | Давление газа, МПа | Природный газ | 10 |
| 7 | $T_0^b$ | Начальная температура большого бака, °C | Хладагент | 5 |
| 8 | $T_{max}^b$ | Максимальная температура нагрева большого бака, °C | Хладагент | 7 |
| 9 | $V_b$ | Объем большого бака, $м^3$ | Хладагент | 1000 |
| 10 | $V_s$ | Объем среднего бака, $м^3$ | Хладагент | 1 |
| 11 | M | Мол. масса газа, $\frac{кг}{моль}$ | Природный газ | 0.0198 |
| 12 | $R$ | Газовая постоянная, $\frac{Дж}{моль \cdot °C}$ | Природный газ | 8.3144598 |
| 13 | $\rho_w$ | Плотность хладагента, $\frac{кг}{м^3}$ | Хладагент | 997 |
| 14 | $c_g$ | Теплоемкость газа, $\frac{Дж}{кг°C}$ | Природный газ | 3041 |
| 15 | $c_w$ | Теплоемкость хладагента, $\frac{Дж}{кг°C}$ | Хладагент | 4200 |

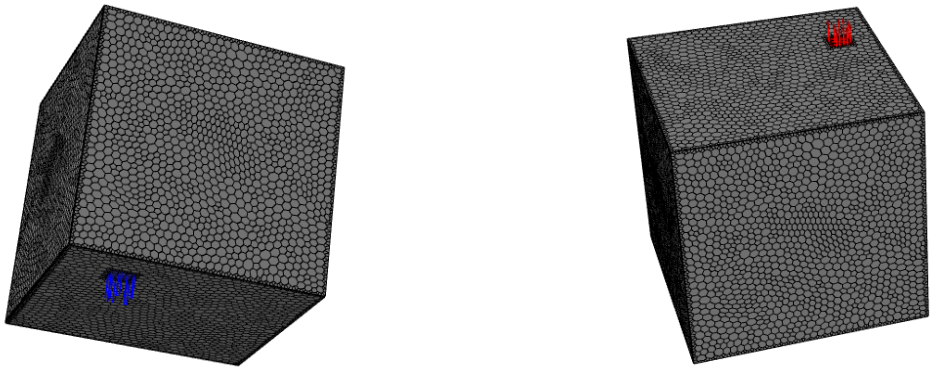
Численное моделирование движения жидкости в большом и среднем баках проводилось в программном комплексе конечно-объемного моделирования *Ansys CFD* [28-32], [33-34]. В качестве численной реализации использовались усредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса с применением модели турбулентности $k - \omega$ [33-34]. Большой бак разбивался на 66 тысяч полигональных элементов, средний бак разбивался на 26 тысяч полигональных элементов.

Сетка конечных объемов для большого бака представлена на рисунке 2. В начальный момент времени вода охлаждена до температуры 5°C. Снизу в бак подается вода постоянной температуры 8°C и переменным расходом, согласно (15) (рис. 3а). Вычисляется температура на выходе из бака, а также время достижения предельной температуры бака 7°C.

На рисунке 4 представлена температура на выходе из бака, полученная на основе аналитической формулы (16) и численным методом компьютерной гидродинамики. Время достижения максимальной температуры большого бака 7°C составило 1636 с, расход хладагента меняется в диапазоне 1467-4402 м$^3$/ч.

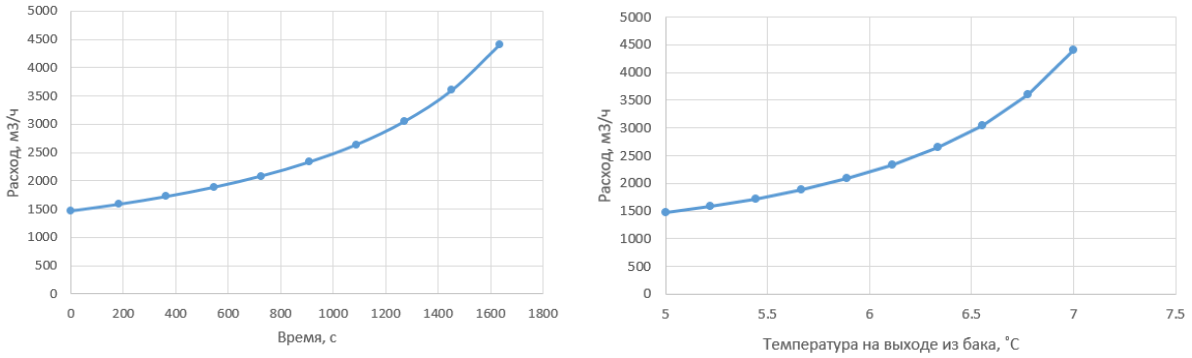
Дополнительно на рисунке 3б указана расходная характеристика в большом баке от температуры на выходе.

На рисунке 5 представлены поля и линии тока температур и скоростей в конечный момент времени 1636 с для большого бака.



*а)* *б)*

*Рисунок 2 – Сетка конечных объемов для большого бака: (а) синим – вход в бак; (б) красным – выход из бака*




*а)* *б)*

*Рисунок 3 – Расходные характеристики в большом баке:*
*(а) расход от времени; (б) расход от температуры на выходе из бака*

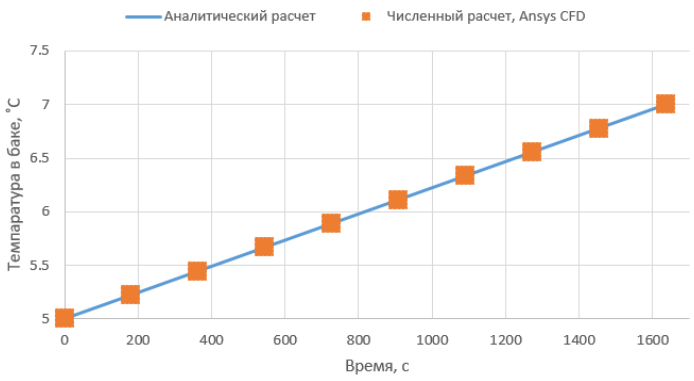



*Рисунок 4 – Температура на выходе из большого бака от времени*

Для определения времени нагрева основного бака до максимальной температуры $T^b_{max}$ можно также воспользоваться формулой для уравнения энергии [2-4], необходимой для нагрева бака:

$$A = V_b \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot (T^b_{max} - T^b_0) = t_{max} \cdot Q, \quad (20)$$

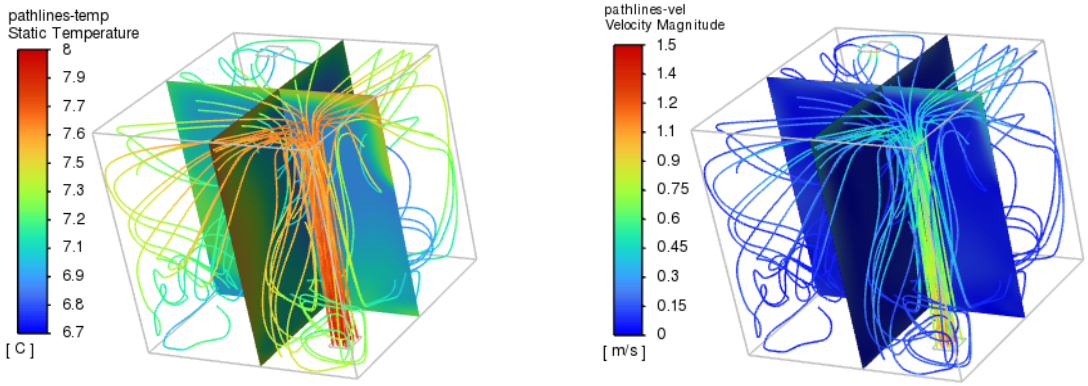
$$t_{max} = \frac{A}{Q}. \quad (21)$$

Здесь $Q$ – мгновенный тепловой поток из (2)-(5).

Далее исследовался теплообмен в среднем баке, объемом 1 м$^3$. На рисунке 6 представлена сетка конечных объемов с обозначением входов (синий цвет) и выхода (красный). Снизу в бак подается вода с постоянным расходом 440.21 м$^3$/ч, вычисленном из балансовых уравнений (2)-(5) и постоянной температурой 8°C (возврат хладагента от теплообменника). Сверху подается вода, у которой температура и объемный расход растут согласно формулам (15), (16) и рисунку 3 (подача хладагента из большой бочки). Исследуется температура хладагента на выходе из среднего бака.

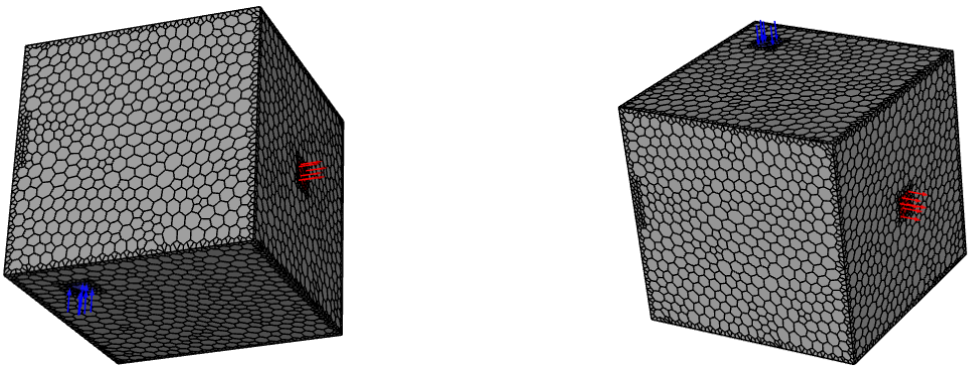
В таблице 3 приводятся температуры на выходе из среднего бака, полученные на основе аналитических формул и численным методом, в зависимости расхода и температуры подачи хладагента от большого бака.

На рисунке 7 представлены поля и линии тока температур и скоростей для среднего бака.



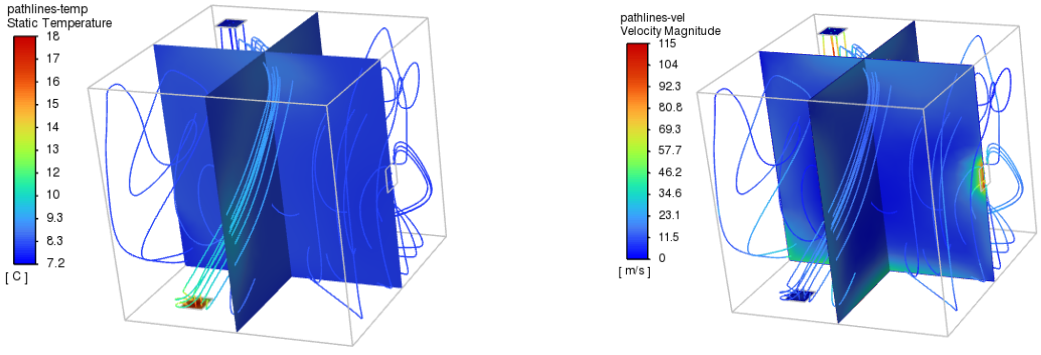

*а)* *б)*

*Рисунок 5 – Поля и линии тока температур и скоростей в конечный момент времени 1636 с для большого бака: (а) поле температур; (б) поле скоростей*



*а)* *б)*

*Рисунок 6 – Сетка конечных объемов для большого бака: (а) синим – входы в бак; (б) красным – выход из бака*




*а)* *б)*

*Рисунок 7 – Поля и линии тока температур и скоростей для среднего бака: (а) поле температур; (б) поле скоростей*

*Таблица 3 – Расход и температура в среднем баке на входе от большого бака, температура в среднем баке на выходе*

| Время, с | Расход на входе от большого бака, м³/ч | Температура на входе от большого бака, °С | Температура на выходе, °С, Ansys CFD | Температура на выходе, °С, аналитический расчет |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 1467.4 | 5.00 | 8.015 | 8 |
| 182 | 1584.7 | 5.22 | 8.014 | 8 |
| 363 | 1722.6 | 5.44 | 8.014 | 8 |
| 545 | 1886.6 | 5.66 | 8.013 | 8 |
| 727 | 2085.2 | 5.89 | 8.014 | 8 |
| 909 | 2330.5 | 6.11 | 8.015 | 8 |
| 1090 | 2641.2 | 6.33 | 8.014 | 8 |
| 1272 | 3047.6 | 6.55 | 8.018 | 8 |
| 1454 | 3601.7 | 6.78 | 8.021 | 8 |
| 1636 | 4402.1 | 7.00 | 8.010 | 8 |

**Выводы.** В данной работе предложена принципиально новая схема процесса теплообмена при использовании запасенного хладагента, состоящая из большого бака с хладагентом, промежуточного бака (смесителя) и основного теплообменника.

Рассмотрены два способа функционирования данной системы, для которых получены определяющие соотношения расходов и температур от времени для поддержания необходимых параметров охлаждения.

Показано, что при регулировании расхода между средним баком и основным теплообменником необходимо знать характеристики теплообменника в зависимости от температуры и расходов хладагента. Это может являться существенной сложностью на практике, поскольку производители подбирают конфигурацию теплообменников для фиксированного набора расходной характеристики и температур. Кроме того, при изменении расходных характеристик и температур хладагента теплообменника практически невозможно создать конфигурацию теплообменника, чтобы мощность теплообмена сохранялась постоянной.

Первый вариант регулирования позволяет нам использовать изначальную конфигурацию теплообменника на всем процессе теплообмена и не требует никаких дополнительных данных. Данный факт позволяет с большой эффективностью осуществлять процесс охлаждения при использовании запасенного хладагента.

Для случая регулирования расхода между большим баков проведены численные эксперименты, а также сравнения с численным решением, полученным методом компьютерной гидродинамики.

Представленная в данной работе схема осуществления охлаждения и теплообмена может быть применена к охлаждению любых газообразных и жидких сред с использованием запасенного хладагента без применения чиллеров непосредственно в процессе теплообмена.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Тепловые и конструктивные расчеты холодильных машин/ Под ред. И.А. Сакуна. Л.: Машиностроение, 1987. – 423 с.

2. Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 416 с.

3. Техническая термодинамика (под ред. Крутова В.И.). – М.: Высшая школа, 1991. – 384 с.

4. Андрющенко А.И. Основы технической термодинамики реальных процессов. – М.: Высшая школа, 1973. – 264 с.

5. Бэр Г.Д. Техническая термодинамика. – М.: "Мир", 1977. – 518 с.

6. Базаров И.П. Термодинамика. М.: Высшая школа, 1983. – 341 с.

7. Feng Li, Kewei Shi, Xihui Sun, Bao Yue, Dong Huang, Rijing Zhao, Yongfeng Zhao, Performance Evaluation of a Vertical-Finned Microchannel and a Fin-Tube Heat Exchangers under Wet and Frosting Conditions, International Journal of Refrigeration, 2024, ISSN 0140-7007, https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2024.03.011.

8. Huifan Zheng, Guoji Tian, Shuang Zeng, Zhehui Zhang, Zehua Lv, Qian Wang, Study on the performance of multi-medium heat exchanger in solar composite refrigeration system, Applied Thermal Engineering, Volume 245, 2024, 122826, ISSN 1359-4311, https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122826.

9. Hui He, Xiyuan Zhou, Ning Lyu, Feng Wang, Caihua Liang, Xiaosong Zhang, Enhancing heat-exchanger performance in frost conditions via superhydrophobic surface modification, Applied Thermal Engineering, Volume 246, 2024, 122914, ISSN 1359-4311, https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122914

10. Chenyi Qian, Jiaxuan Wang, Haozhang Zhong, Xiang Qiu, Binbin Yu, Junye Shi, Jiangping Chen, Experimental investigation on heat transfer characteristics of copper heat exchangers based on triply periodic minimal surfaces (TPMS), International Communications in Heat and Mass Transfer, Volume 152, 2024, 107292, ISSN 0735-1933, https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107292.

11. Nathan Colgan, Gregory Nellis, Mark Anderson, Modelling and optimization of a forced convection heat exchanger for Mars waste heat rejection for power cycle and cryocooling applications, Applied Thermal Engineering, Volume 242, 2024, 122463, ISSN 1359-4311, https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122463.

12. Federico Torri, Fabio Berni, Mauro Giacalone, Sara Mantovani, Silvio Defanti, Giulia Colombini, Elena Bassoli, Andrea Merulla, Stefano Fontanesi, A methodology to reduce the computational effort in *3D*-CFD simulations of plate-fin heat exchangers, Applied Thermal Engineering, Volume 245, 2024, 122843, ISSN 1359-4311, https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122843.

13. Jin Huang, Xiangyu Luo, Pengfei Wang, Zhenqi Qin, Jiaxin Gu, Shuaiqi Zhou, Wensheng Zhao, Multi-objective optimization of a double helical coil heat exchanger using response surface method and genetic algorithm, International Journal of Thermal Sciences, Volume 199, 2024, 108927, ISSN 1290-0729, https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2024.108927

14. Guoqiang Xu, Zhiwei Liu, Jie Wen, Qihang Liu, Laihe Zhuang, Theoretical and experimental study on a novel evaluation criteria of heat exchangers applied in aero engines, International Communications in Heat and Mass Transfer, Volume 152, 2024, 107259, ISSN 0735-1933, https://doi.org/10.1016/j.icheat-

masstransfer.2024.107259.

15. K. Venkata Krishna, Praveen Kumar Kanti, M.P. Maiya, A novel flat coil tube heat exchanger for metal hydride hydrogen storage reactors, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 64, 2024, Pages 98-108, ISSN 0360-3199, https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.03.063.

16. Jiadong Ji, Yuling Pan, Jingwei Zhang, Baojun Shi, Lexiang Bao, Numerical study on the effect of baffle structure on the heat transfer performance of elastic tube bundle heat exchanger, Applied Thermal Engineering, Volume 238, 2024, 122220, ISSN 1359-4311, https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.122220.

17. Сапожников С.З., Китанин Э.Л. Техническая термодинамика и теплопередача. СПб.: Изд. СПбГТУ,2001. – 317 с.

18. Сергель О.С. Прикладная гидрогазодинамика: Учебник для авиационных вузов. М.: машиностроение, 1981. – 374 с.

19. Кузовлев В.А. Техническая термодинамика и основы теплопередачи: Учебник для машиностр. спец. техникумов под ред. Л.Р. Стоцкого - 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1983. – 335 с.

20. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справочное пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.: ил.

21. Bingqi Wang, Xiaokun Wu, Chuang Wang, Zhiping Zhang, Yuchen Li, Ziwen Xing, Performance improvement of twin-screw refrigeration compressors for chillers by modifying the suction arrangement, International Journal of Refrigeration, Volume 158, 2024, Pages 100-110, ISSN 0140- 007, https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.11.007.

22. Kexin Yi, Yuanyang Zhao, Guoxin Yu, Qichao Yang, Guangbin Liu, Liansheng Li, Research on performance of refrigeration centrifugal compressor with gas bearings for water chillers, Energy Reports, Volume 8, 2022, Pages 5562-5569, ISSN 2352-4847, https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.04.031.

23. Junnan Song, Guangbin Liu, Jieming Gong, Qichao Yang, Yuanyang Zhao, Liansheng Li, Simulation on performance and regulation strategy of centrifugal refrigeration compressor with gas bearings in water chiller, Applied Thermal Engineering, Volume 236, Part B, 2024, 121650, ISSN 1359-4311, https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121650.

24. Лашутина Н.Г. и др. Техническая термодинамика с основами теплопередачи гидравлики: Учеб. пособие для учащихся техникумов по специальности «Холодильно-компрессорные машины и установки»/Н.Г. Лашутина, О.В. Макашова, Р.М. Медведев; под общ. ред. Р.М. Медведева. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988. – 336 с.: ил.

25. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е, стереотип. М., «Энергия», 1977. – 344 с. с ил.

26. Ерохин В.Г., Маханько М.Г. Сборник задач по основам гидравлики и теплотехники: Учебное пособие. Изд,4-е. – М.: Книжный дом («Либроком»), 2012. – 240 с.

27. Крейт Ф., Блэк У. Основы теплопередачи: Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 512 с., ил.

28. ANSYS Inc, Fluent User's Guide: Release 2022 R1 January 2022, 2022. Canonsburg, PA.

29. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей: В 2-х томах: Т. 1: Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 504 с., ил.

30. Белоцерковский О. Численное моделирование в механике сплошных сред: 2-е изд., перераб. и доп.-М.: Физматлит, 1994. – 448 с.

31. Павловский В.А., Никущенко Д.В. П 12 Вычислительная гидродинамика. Теоретические основы: Учебное пособие. – СПб.: Издательство «Лань», 2018. – 368 с.: ил.

32. Pope, S. (2000). Turbulent Flows. Cambridge University Press. 749 p.

33. Panfilov, I.; Beskopylny, A.N.; Meskhi, B. Numerical Simulation of Heat Transfer and Spread of Virus Particles in the Car Interior. Mathematics 2023, 11, 784. https://doi.org/10.3390/math11030784.

34. Beskopylny, A.N.; Panfilov, I.; Meskhi, B. Modeling of Flow Heat Transfer Processes and Aerodynamics in the Cabins of Vehicles. Fluids 2022, 7, 226. https://doi.org/10.3390/fluids7070226.

*Статья поступила в редакцию 08.04.2024*
*Статья принята к публикации 17.06.2024*

УДК 614.8
EDN: TIXOQM

# ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ПОЖАРНОГО РИСКА ДЛЯ УЧАСТКОВ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНЫХ ВЕЩЕСТВ АВТОМОБИЛЬНЫМ ТРАНСПОРТОМ

© Авторы 2024

SPIN: 8180-9072
AuthorID: 535992
ORCID: 0000-0001-8572-4697
ResearcherID: R-1013-2017
ScopusID: 57205428646

**БЫЗОВ Антон Прокопьевич,** кандидат технических наук, доцент,
доцент Высшей школы техносферной безопасности Инженерно-строительного института
*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*
*(195251, Россия, Санкт-Петербург, улица Политехническая, 29, e-mail: byzov_ap@spbstu.ru)*

SPIN: 6190-6740
AuthorID: 320362
ORCID: 0000-0001-9695-8800
ScopusID: 57200547443

**ЕФРЕМОВ Сергей Владимирович,** кандидат технических наук, доцент,
доцент Высшей школы техносферной безопасности Инженерно-строительного института
*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*
*(195251, Россия, Санкт-Петербург, улица Политехническая, 29, e-mail: efremov_sv@spbstu.ru)*

SPIN: 2487-0571
AuthorID: 999167
ORCID: 0000-0002-7684-4192
ScopusID: 57206731710

**ПОПОВА Яна Андреевна,** аспирант
*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*
*(195251, Россия, Санкт-Петербург, улица Политехническая, 29, e-mail: penner_yaa@spbstu.ru)*

**Аннотация.** В статье рассмотрены возможные виды аварий при транспортировке опасных веществ автомобильным транспортом. Осуществлено моделирование потенциального риска, формирующегося от возможных аварий, возникающих при движении автоцистерны по определенному маршруту. Описан подход к оценке потенциального пожарного риска для участка транспортирования опасных веществ автомобильным транспортом. Рассмотрена зависимость потенциального риска от расстояния до участка транспортирования опасных веществ. Применен метод математического моделирования поля потенциального риска путем интегрального сложения вкладов элементарных участков на пути движения автоцистерны в результате возможного возникновения различных сценариев. Представлены результаты апробации предложенного подхода, рассмотрены и проанализированы графики зависимости потенциального риска от различных параметров, а также зависимость безопасного расстояния для населения, проживающего вблизи участка транспортирования пожаровзрывоопасных веществ автомобильным транспортом от объема транспортируемого опасного вещества, частоты поездок и скорости движения автоцистерны. Определена необходимость проведения исследований, направленных на определение влияния на аварийность автоцистерны технических, технологических, организационных и иных факторов, включая скорость движения автоцистерны.

**Ключевые слова:** оценка риска аварий, автоцистерна, потенциальный пожарный риск, авария, пожаровзрывоопасное вещество, участок транспортирования, безопасность, безопасное расстояние, индивидуальный риск, поле потенциального риска.

# APPROACH TO ASSESSMENT OF POTENTIAL FIRE RISK FOR HAZARDOUS SUBSTANCES TRANSPORTATION SECTIONS BY ROAD TRANSPORT

© The Authors 2024

**BYZOV Anton Prokop'evich,** candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the Higher School of Technosphere Safety of the Civil Engineering Institute
*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*
*(195251, Russia, St. Petersburg, street Polytechnicheskaya, 29, e-mail: byzov_ap@spbstu.ru)*

**EFREMOV Sergey Vladimirovich,** candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the Higher School of Technosphere Safety of the Civil Engineering Institute
*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*
*(195251, Russia, St. Petersburg, street Polytechnicheskaya, 29, e-mail: efremov_sv@spbstu.ru)*

**POPOVA Iana Andreevna,** post-graduate student
*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*
*(195251, Russia, St. Petersburg, street Polytechnicheskaya, 29, e-mail: penner_yaa@spbstu.ru)*

**Abstract.** The article considers the possible types of accidents during the transportation of hazardous substances by road transport. The potential risk is modeled, which is formed from possible accidents that occur during the movement of a tank truck along a certain route. The approach to assessing the potential fire risk for the site of transportation of hazardous substances by road is described. The dependence of the potential risk on the distance to the hazardous substance transportation site is considered. The event tree in case of depressurization of a tank truck carrying flammable liquid is shown. A mathematical modeling method is used to estimate the total generated potential risk field when a tank truck is moving as a result of possible occurrence of various scenarios. The results of testing the proposed approach are presented, graphs of the dependence of potential risk on various parameters are examined and described, as well as the dependence of the safe distance for the population living near a hazardous production facility on the volume of the transported hazardous substance, frequency of trips and speed of the tank truck. The need to conduct studies aimed at determining the impact on the accident rate of a tank truck of technical, technological, organizational and other factors, including the speed of the tank truck.

**Keywords:** risk assessment, tank truck, potential fire risk, accident, hazardous substance, transportation sections, safety, safe distance, individual risk, potential risk field.

***Для цитирования:*** *Бызов А.П. Подход к оценке потенциального пожарного риска для участков транспортирования пожаровзрывоопасных веществ автомобильным транспортом / А.П. Бызов, С.В. Ефремов, Я.А. Попова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 2(66). – С. 189-195. – EDN: TIXOQM.*

**Введение.** Транспортные средства непрерывно осуществляют перевозку пассажиров и грузов по всей территории страны, включая опасные вещества. При этом они могут удаляться от мест, где можно получить экстренную помощь в случае аварии. Кроме того, растет сложность и масштабы транспортных систем [1-4], что подтверждает необходимость управления рисками. Анализ статистики пожаров по основным видам объектов пожаров показывает, что пожары на транспортных средствах занимают одну из лидирующих позиций [5]. Больше внимания с каждым годом уделяется транспортной пожарной безопасности, что сопровождается снижением количества пожаров, смертей и травм, однако показатели остаются достаточно высокими.

Для транспортировки нефти и нефтепродуктов используются трубопроводы и различные виды грузового транспорта: железнодорожный, водный, автомобильный и воздушный [6-8].

На небольшие расстояния нефть и нефтепродукты лучше всего перевозить автотранспортом – специально оборудованными грузовыми автомобилями, тягачами, автоцистернами, прицепами и полуприцепами.

Однако аварии при транспортировке могут привести к серьёзным последствиям. Даже небольшое количество нефти или нефтепродуктов может стать причиной возникновения крупного очага горения с протяженными зонами действия поражающих факторов [1, 9].

Анализ аварий, произошедших на территории Российской Федерации и связанных с транспортированием опасных веществ автомобильным транспортом и некоторых аварий на других аналогичных объектах за период с 2018 г. по 2022 г. показал, что чаще всего происходит разгерметизация автоцистерны и разлив опасного вещества. Аварии по такому сценарию составляют 33% от общего числа аварий. Сценарии, связанные с механическими повреждениями и воспламенением паров с последующим возгоранием автомобильной цистерны, составляют 27% и 22% соответственно. Реже всего происходит взрыв с последующим возгоранием [10-13].

На рисунке 1 представлены результаты проведенного анализа в виде круговой диаграммы.




*Рисунок 1 – Диаграмма распределения аварий по видам*

Развитие пожаров при транспортировании опасных веществ автомобильным транспортом имеет ряд отличий от пожаров на стационарных объектах, в частности, по способам инициирования события или по возможности одновременного распространения на разных участках [14-18]. Такие пожары могут нанести значительный ущерб из-за особенностей современных автомобильных дорог: их сложной структуры, плотной застройки и большого количества маршрутов, проходящих через населенные пункты.

**Методология.** Цель исследования – на основе требований в области пожарной и промышленной безопасности, а также опыта транспортирования опасных грузов описать подход к оценке потенциального пожарного риска для участка транспортирования опасных веществ автомобильным транспортом

В основе оценки индивидуального пожарного риска лежит процесс моделирования полей потенциального пожарного (потенциального) риска. В качестве объекта исследования рассматривается потенциальный риск, который формируется вдоль автодорог, по которым осуществляется транспортирование пожаровзрывоопасных веществ.

В данном исследовании применен метод математического моделирования для оценки суммарного формируемого поля потенциального риска при движении автоцистерны в результате возможного возникновения различных сценариев.

**Результаты.** Потенциальный пожарный риск является комплексным показателем риска, характеризующим пространственное распределение опасных факторов пожара и взрыва по объекту и близлежащей территории [9].

Определение потенциального риска на опасном производственном объекте необходимо для выявления зоны повышенной опасности поражения людей. На основании полученных данных о распределении потенциального риска можно определить наиболее неблагоприятные места расположения рабочего персонала и третьих лиц, находящихся в селитебной зоне вблизи опасного производственного объекта [19, 20].

Рассмотрим потенциальный риск в верхней точке территории (точка *O*), изображенной на рисунке 2. В этой точке находится объект, на который влияют основные поражающие факторы при возникновении возможных аварий. В точке *A* располагается источник опасности (автоцистерна), который перемещается вдоль оси *S*, формируя вокруг себя поле потенциального риска. Задача усложняется ее динамической постановкой, т.к. автоцистерна находится в движении [21].

При моделировании потенциального риска введем ограничение. Участок транспортирования опасных веществ рассматривается как прямой отрезок, его начало помещается в начало декартовой системы координат.

Для того, чтобы смоделировать потенциальный риск, который формируется от возможных аварий, возникающих при движении автоцистерны по определенному маршруту, разобьем этот путь на некоторые элементарные участки *ΔS*. При этом полагая, что на рассматриваемом отрезке *ΔS* автоцистерна находится в неподвижном состоянии. Расчет ведется с момента времени *t* до *t* + *Δt*, где *Δt* промежуток времени на рассматриваемом отрезке.

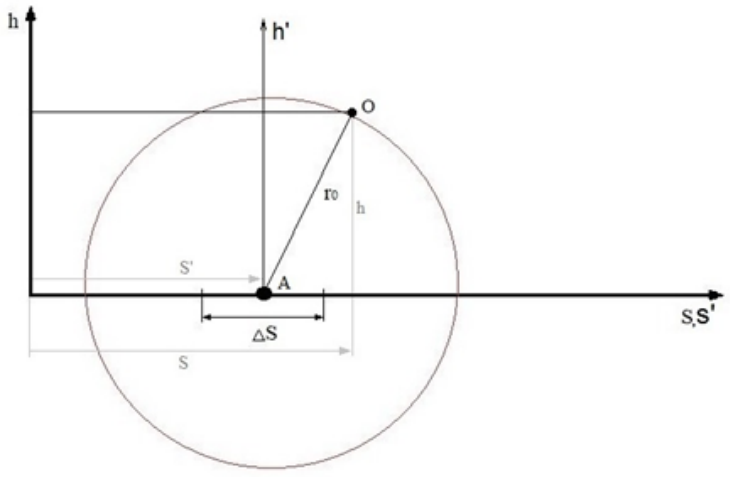



*Рисунок 2 – Схема участка транспортирования опасных веществ*

Определим вклад в общую картину потенциального риска для точки *O* при возникновении аварий на участке *ΔS*.

Значение потенциального риска в точке *O* будет определяться по формуле:

$$R_{\Delta пл} = \frac{\Delta S}{V} \cdot \frac{\gamma}{T_{год}} \cdot P \cdot Q(r_0), \quad (1)$$

где *P* – вероятность возникновения аварии (1/год);

*γ* – частота поездок автоцистерны в течение года, раз;

$Q(r_0)$ – условная вероятность поражения человека в точке *O*;

*ΔS*/*V* – это промежуток времени на рассматриваемом отрезке (*Δt*), *ΔS* – длина рассматриваемого

участка, м;

$V$ – скорость автоцистерны, м/ч;

$T_{год}$ – количество часов в году, ч.

Найдем расстояние, на котором находится объект от автоцистерны в точке $O$, которое равно $r_0$, определяемое по формуле (2).

$$r_0 = \sqrt{(S - S')^2 + h^2}\,. \quad (2)$$

Подставив полученные значения в формулу 1, получаем следующее выражение:

$$R_{\Delta пт} = \frac{\Delta S}{V} \cdot \frac{\gamma}{T_{год}} \cdot P \cdot Q\left[\sqrt{(S - S')^2 + h^2}\right], \quad (3)$$

где $\frac{\Delta S}{V} \cdot \frac{\gamma}{T_{год}}$ – это доля времени пребывания автоцистерны на участке $\Delta S$.

Величина потенциального риска определяется как сумма вкладов в потенциальный риск от всех следующих друг за другом участков вдоль траектории движения автоцистерны. В пределе перейдем к интегральному выражению и получим формулу для нахождения потенциального риска в рассматриваемой точке территории для каждого $i$-ого сценария развития аварии:

$$R_{пт_i}(S,h) = \int_0^S \frac{1}{V} \cdot \frac{\gamma}{T_{год}} \cdot P_i \cdot Q_i\left[\sqrt{(S - S')^2 + h^2}\right] dS'\,. \quad (4)$$

Для оценки потенциального пожарного риска, который формируется в результате потенциальной возможности реализации всех возможных сценариев просуммируем вклады в потенциальный риск по каждому отдельному сценарию [9, 24]. Выражения для потенциального риска в точке О будет иметь вид:

$$R_{пт}(S,h) = \sum_{i=1}^{n} \int_0^S \frac{1}{V} \cdot \frac{\gamma}{T_{год}} \cdot P_i \cdot Q_i\left[\sqrt{(S - S')^2 + h^2}\right] dS', \quad (5)$$

где $n$ – число сценариев развития аварии;

$P_i$ – частота реализации $i$-ого сценария развития пожароопасной ситуации, год$^{-1}$;

$Q_i$ – условная вероятность поражения человека в рассматриваемой точке территории (точка $O$) в результате реализации $i$-ого сценария аварии.

Изложенный подход может быть использован при проведении анализа риска для опасных производственных объектов участков транспортирования опасных веществ автомобильным транспортом.

Рассмотрим зависимость потенциального риска от расстояния до участка транспортирования опасных веществ. График зависимости представлен на рисунке 3, расчеты велись при фиксированном значении объема автоцистерны 10 м$^3$ и 20 м$^3$ с учётом допущения, что коэффициент разлития составляет 20 м$^{-1}$ [23].

Дерево событий в соответствии с рекомендациями [24] будет иметь вид, представленный на рисунке 3. При разгерметизации автоцистерны с легковоспламеняющейся жидкостью возможно возникновение следующих сценариев:

1. Пролив опасного вещества без возгорания.
2. Пожар пролива.
3. «Пожар-вспышка».
4. Взрыв топливно-воздушной смеси.

Частоту разгерметизации автоцистерны можно оценить по частоте возникновения ДТП с участием транспортных средств, перевозящих опасные грузы по [10] за период в пять лет. В этом случае частота составит 28,6/115051=2,49·10$^{-4}$ 1/год.

Примем данную частоту для инициирующего события «Разгерметизация оборудования» по дереву событий, представленному на рисунке 3.

Для проведения расчетов примем осреднённые параметры транспортирования опасных веществ. Скорость движения автоцистерны – 40 км/час, протяженность участка транспортирования – 10 км, частота поездок автоцистерны – 5 раз в день. В дальнейшем будет проведен анализ чувствительности величины потенциального риска к изменению принятых осредненных показателей.

На рисунке 4 представлен график зависимости потенциального риска от расстояния для автоцистерны двух объемов – 10 и 20 м$^3$.

Наличие перегибов отражает прекращение действия поражающих факторов непосредственного огневого поражения в очаге пожара и соответствует радиусу пролива.

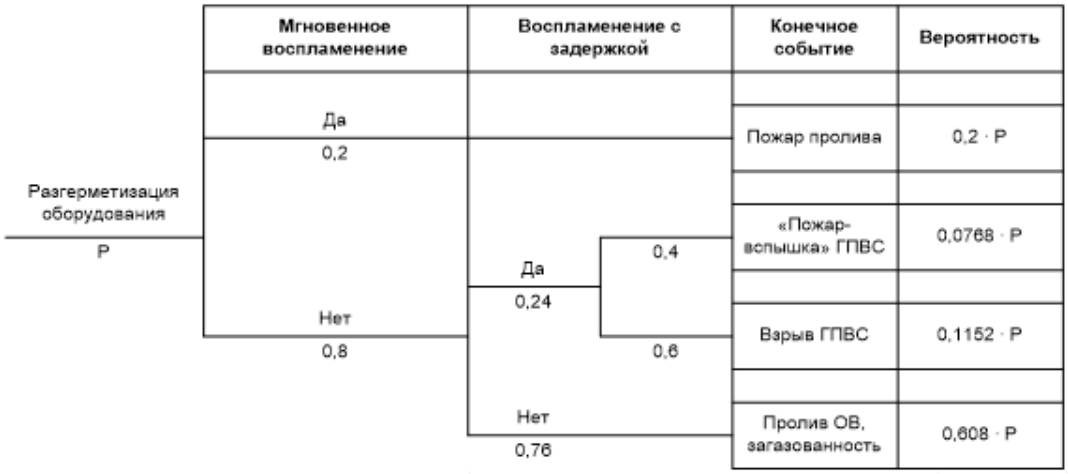



*Рисунок 3 – Дерево событий при разгерметизации автоцистерны, перевозящей легковоспламеняющуюся жидкость (нефть)*

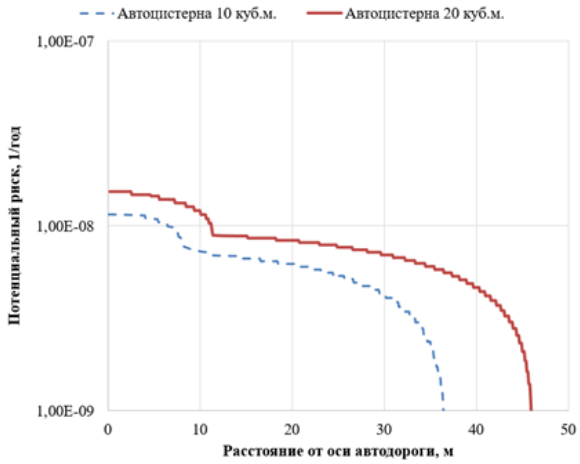



*Рисунок 4 – График зависимости потенциального риска от расстояния до участка транспортирования опасных веществ при объеме автоцистерны 10 м³ и 20 м³*

Однако, больший интерес представляет определение безопасного расстояния для людей, находящихся в жилой зоне, общественно-деловой зоне или зоне рекреационного назначения вблизи автодороги. В качестве критерия безопасного уровня потенциального пожарного риска примем величину индивидуального пожарного риска в результате воздействия опасных факторов пожара на производственном объекте для людей, находящихся в жилой зоне, общественно-деловой зоне или зоне рекреационного назначения вблизи объекта, которая не должна превышать одну стомиллионную в год [24]. Такое допустимо при условии рассмотрения в качестве реципиентов людей, проживающих в жилых домах вблизи автодороги с вероятностью присутствия 1.

Рассмотрим график зависимости безопасного расстояния от объема транспортируемого опасного вещества, то есть объема автоцистерны [25, 26]. Этот график зависимости представлен на рисунке 5. Наблюдается устойчивый рост безопасного расстояния с увеличением объема автоцистерны.

На рисунке 6 представлена зависимость безопасного расстояния от оси автодороги от частоты поездок в день. Из графика следует, что с увеличением частоты поездок безопасное расстояние увеличивается до расстояния, на котором прекращается существенное воздействие поражающих факторов. При принятых параметрах транспортирования опасного вещества протяженность зоны воздействия высокотемпературными продуктами горения паров нефти составит 46,3 метра. С увеличением частоты поездок безопасное расстояние будет постепенно приближаться к указанной границе зоны.

На рисунке 7 представлен график зависимости безопасного расстояния от оси автодороги от скорости движения автоцистерны. Наблюдается уменьшение полученного безопасного расстояния с увеличением скорости автоцистерны, что может показаться неоднозначным с точки зрения общепринятого мнения о росте аварийности с увеличением скорости автотранспортных средств [27-29]. Однако, с уменьшением скорости движения автоцистерны опасное вещество большую долю времени пребывает вблизи реципиентов и, соответственно, повышается вероятность её разгерметизации на данном участке с возникновением поражающих факторов, способных причинить вред людям. Безусловно, такой вид графика обусловлен тем, что в качестве частоты разгерметизации автоцистерны была принята осредненная частота аварий без учета возможности повышения частоты аварий при увеличении скорости движения. Анализ данной зависимости является отдельным исследованием и выходит за рамки данной статьи.

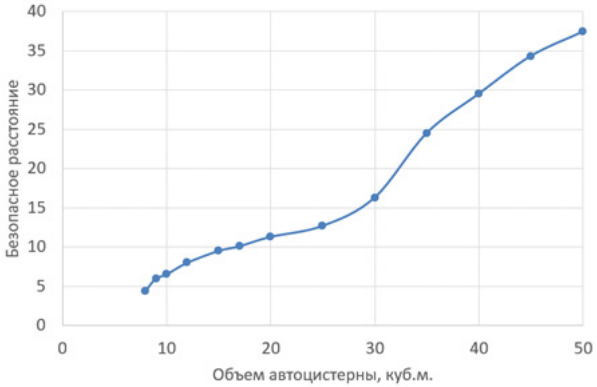



*Рисунок 5 – Зависимость безопасного расстояния от объема автоцистерны*

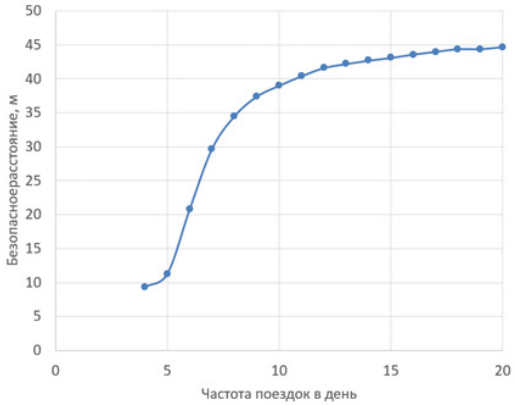



*Рисунок 6 – Зависимость безопасного расстояния от частоты поездок для автоцистерны объемом 20 м³*

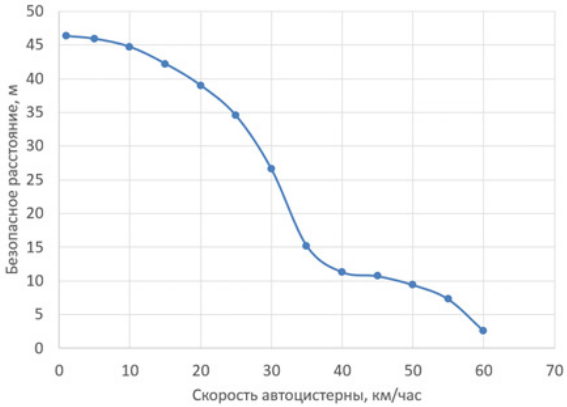



*Рисунок 7 – Зависимость безопасного расстояния от скорости автоцистерны для автоцистерны объемом 20 м³*

**Обсуждение.** Анализ аварий и причин их возникновения на участке транспортирования опасных веществ автомобильным транспортом показал, что при эксплуатации таких объектов возможно возникновение пожароопасных ситуаций с тяжелыми последствиями для окружающей среды и людей. Эффективным инструментом планирования мероприятий по повышению безопасности является анализ риска [27, 30, 31].

Представленная математическая модель оценки потенциального пожарного риска для участков транспортирования пожаровзрывоопасных веществ автомобильным транспортом позволяет учитывать интенсивность воздействия поражающих факторов, скорость и частоту движения автоцистерны, а также осуществлять оценку безопасного расстояния по показателю индивидуального риска для людей, находящихся в жилой зоне, общественно-деловой зоне или зоне рекреационного назначения вблизи участка транспортирования опасных веществ.

Проведен анализ чувствительности потенциального риска и безопасного расстояния к изменению указанных параметров. Полученные зависимости отражают логику протекающих процессов и подтверждают адекватность разработанной математической модели.

Проведённый анализ показал перспективность проведения дальнейших исследований, направленных на разработку методики, позволяющей проводить оценку частоты разгерметизации автоцистерны в зависимости от множества влияющих факторов, относящихся к условиям автодороги, характеристикам водителя, внешним условиям, состоянию автотранспорта.

**Выводы.** Таким образом, предложенный подход позволяет произвести расчет потенциального риска для участков транспортирования опасных веществ автомобильным транспортом.

На основе данных о потенциальном риске и вероятности нахождения человека в определенной точке исследуемой территории можно определить индивидуальный риск.

Изложенный подход был апробирован, результаты представлены в виде графиков, которые показывают зависимость потенциального риска от расстояния, а также безопасного расстояния для людей, живущих рядом с опасным производственным объектом, от объёма перевозимого опасного вещества, частоты поездок и скорости движения автоцистерны.

Проведенный анализ показал необходимость проведения исследований, направленных на определение влияния на аварийность автоцистерны технических, технологических, организационных и иных факторов, включая скорость движения автоцистерны.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Малышев Б.В., Ефимов Н.А. Оценка возможных последствий аварийных разливов нефти и нефтепродуктов в результате дорожно-транспортных происшествий.

Обоснование оптимального состава сил и средств локализации и ликвидации последствий аварий // Технологии гражданской безопасности: электрон. науч. журн. – 2009. – № 1-2.

2. Королева, Л.А. О перспективе автономных атомных электростанций на плавучих транспортных средствах / Л.А. Королева, В.Н. Ложкин, М.П. Солодских // Надежность и долговечность машин и механизмов: материалы VII Всероссийской научно-практической конференции. – Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия, 2016. – С. 76-79.

3. Королева, Л.А. Совершенствование системы технического обслуживания и ремонта как одно из направлений повышения надежности и безопасности пожарных автомобилей / Л.А. Королева, В.Н. Ложкин // Надежность и долговечность машин и механизмов: материалы VI Всероссийской научнопрактической конференции. – Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия, 2015. – С. 54-58.

4. Ali Vaezi, Manish Verma, Railroad transportation of crude oil in Canada: Developing long-term forecasts, and evaluating the impact of proposed pipeline projects, Journal of Transport Geography, 2018. – No 69. – P. 98-111.

5. Пожары и пожарная безопасность в 2022 году: информ.-аналитич. сб. П 46 Балашиха: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2023. – 80 с.

6. Usman Abubakar An Overview of the Occupational Safety and Health Systems of Nigeria, UK, USA, Australia and China: Nigeria Being the Reference Case Study/ American Journal of Educational Research, 2015, – V. 3. – N. 11, – P. 1350-1358.

7. Sarsembayev, A.M., Sarsembayev, M.D., Kussainova, K.A., & Nazarkulova, T.L. Compliance of national legal quality level, transport and transportation services safety with world standards in perspective. Journal of Applied Engineering Science, 2020, 18(4). – P. 571 - 577.

8. Mattos, Maria Beatriz. "Application of Oil Spill Environmental Sensitivity Analyses to Brazilian Road Networks." Paper presented at the SPE International Conference on Health, Safety and Environment in Oil and Gas Exploration and Production, Rio de Janeiro, Brazil, April 2010.

9. Приказ Ростехнадзора "Об утверждении Руководства по безопасности "Методические основы анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах" от 03.11.2022 № 387.

10. Синицын В.В., Татаринов В.В., Прус Ю.В., Кирсанов А.А. Статистика автомобильных перевозок опасных грузов и происшествий // Технологии техносферной безопасности. – 2018. – № 4(80). – С. 24-35.

11. Томаков М.В., Томаков В.И. Оценка комплексного показателя пожарной опасности сельского населения Российской Федерации // Безопасность жизнедеятельности. – 2023. – №1. – С. 22-31.

12. Гармышев В.В., Воронин С.В., Коваль В.В. Мониторинг и оценка индивидуального риска гибели людей в результате техносферных пожаров на территории Приморского края // Безопасность жизнедеятельности. – 2022. – №7. – С. 51-55.

13. Вяльцев А.В., Лепихова В.А., Ляшенко Н.В., Чибинев Н.Н. Пути снижения числа чрезвычайных ситуаций, связанных с пожарами на транспортных средствах // Безопасность жизнедеятельности. – 2022. – №10. – С. 30-35.

14. Юсупов, Т.Р. Статистический анализ причин аварийности на железнодорожном транспорте / Т.Р. Юсупов, Р.Р. Шайдуллин, А.Н. Елизарьев // Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире. – СПб: информационный издательский учебно-научный центр «Стратегия будущего». – 2015. – № 21-1. – С. 189-192.

15. Думнов, С.Н. Количественная оценка пожарной опасности и безопасности объектов железнодорожного транспорта [Электронный ресурс] / С.Н. Думнов, В.А. Тарасенко // Вестник Восточно-Сибирского института МВД России. – 2013. – № 4 (67).

16. Савчук, О.Н. Пути совершенствования прогнозирования последствий аварий (разрушений) железнодорожных цистерн с аварийно-химически опасными веществами в условиях информационной войны [Электронный ресурс] / О.Н. Савчук, А.А. Аксенов // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. – 2015. – № 1. – С. 18-28.

17. Буралев, Ю.В. Безопасность жизнедеятельности на транспорте: учебник для студ. учреждений высш. проф. образования / Ю.В. Буралев, 5-е изд., перераб. – М.: Академия, 2012. – 288 с.

18. Королева, Л.А. Сравнительный анализ пожарных рисков при железнодорожных перевозках нефтепродуктов в Российской Федерации и Европейском Союзе [Электронный ресурс] / Л.А. Королева, С.А. Головин, Г.Б. Свидзинская // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. – 2018. – № 3. – С. 17-54.

19. Ефремов С.В., Логвинова Ю.В., Полюхович М.А. Метод оценки производственной среды нестационарных рабочих мест // Безопасность жизнедеятельности. – 2020. – №6. – С. 8-12.

20. Алборов И.Д., Цгоев Т.Ф., Тедеева Ф.Г. Обеспечение безопасности транспортных потоков в селитебных зонах // Безопасность жизнедеятельности. – 2022. – №11. – С. 3-10.

21. Колесников Е.Ю. Способы количественной оценки и уменьшения неопределенности аварийного риска взрывопожароопасных объектов // Надежность. – 2020. – Т. 20. – № 3. – С. 61-67.

22. Козлитин А.М., Попов А.И., Козлитин П.А. Теоретические основы и практика анализа техногенных рисков. Вероятностные методы количественной оценки опасностей техносферы. Саратов: СГТУ, 2002. – 180 с.

23. Приказ МЧС РФ "Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах" от 10.07.2009 № 404 (Зарегистрировано в Минюсте России 17.08.2009 № 14541).

24. Федеральный закон "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности" от 22.07.2008 № 123-ФЗ.

25. Колесников Е.Ю. Необходимость учета неопределенности при количественной оценке пожарного риска // Пожарная безопасность. – 2022. – № 4(109). – С. 89-98.

26. CPR-18E Guidelines for quantitative risk assessment (Purple book). 2-nd ed. – Hague: VROM, 2005. – 237 p.

27. Jin Jun. Risk assessment method for vapor cloud explosion accident // Fire technology and product information. – 2014. – №. 12. – С. 25-27.

28. Zhang B., Liu Y., Qiao S. A quantitative individual risk assessment method in process facilities with toxic gas release hazards: a combined scenario set and CFD approach // Process safety progress. – 2019. – Т. 38. – №. 1. – С. 52-60.

29. Transportation research board special report 324 Designing Safety Regulations for High-Hazard Industries/The National Academies Press, 2018

30. Marques RO, de Vasconcelos V. Risk Management //VII Annual Scientific Initiation Seminar of the Nuclear Technology Development Center Abstract book. – С. 29.

31. Hemmatian B., Casal J., Planas E., Essential points in the emergency management in transport accidents which can lead to a bleve-fireball, Chemical Engineering Transactions, 2017. – N. 57. – P. 439-444.

*Статья поступила в редакцию 09.04.2024*
*Статья принята к публикации 17.06.2024*

УДК 504.05/.06
EDN: ONUOSY

# ИССЛЕДОВАНИЕ УРОВНЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ И ЧЕЛОВЕКА ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ШУМА

©Автор(ы) 2024

SPIN: 9459-8170
AuthorID: 1122812
ORCID: 0009-0000-1224-1770
ResearcherID: JCW-6897-2023

**МИШИНА Кристина Дмитриевна,** аспирант
*Пензенский государственный университет*
(*440026, Россия, г. Пенза, улица Красная, 40, e-mail: kristina_mishina_1998@mail.ru*)

SPIN: 3519-3682
AuthorID: 271281
ORCID: 0000-0002-3726
ResearcherID: v-7481-2018
ScopusID: 57205663503

**БЕЗБОРОДОВА Оксана Евгеньевна,** доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Техносферная безопасность» Политехнический институт
*Пензенский государственный университет*
*(440026, Россия, г. Пенза, улица Красная, 40, e-mail: oxana243@yandex.ru)*

SPIN: 3024-1393
AuthorID: 183204
ORCID: ID 0000-0001-9299-1005
ResearcherID: Y-3115-2018
ScopusID: 56613172200

**БОДИН Олег Николаевич,** доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Техническое управление качеством»
*Пензенский государственный технологический университет*
*(440039, г. Пенза, проезд Байдукова/улица Гагарина, д. 1а/11, bodin_o@inbox.ru)*

SPIN: 5333-3870
AuthorID: 671445
ORCID: 0009-0004-2721-3839

**КАМАРДИНА Наталья Владленовна,** кандидат технических наук,
доцент кафедры «Техносферная безопасность» Политехнический институт
*Пензенский государственный университет*
*(440026, Россия, г. Пенза, улица Красная, 40, e-mail: alisa-melafon@mail.ru)*

**Аннотация.** Развитие общества привело к увеличению числа промышленных предприятий, автомобильного транспорта и росту городов и, как следствие, к увеличению объектов оказывающих акустическое воздействие на окружающую среду и человека. В последнее время акустическое воздействие связывают с проблемой обеспечения экологической безопасности. Акустическое воздействие приводит к заболеваниям органов слуха, сердечно-сосудистой и нервной систем, к психическим расстройствам, недосыпам и нарушением координации у человека. При распространении в окружающей среде акустическое воздействие нарушает нормальные процессы в растительном и животном мире. Для определения и оценки уровня акустического воздействия рассчитывают уровни шума в естественных экосистемах, местах работы и проживания людей и определяют риск возникновения. В работе приведены результаты определения и оценки уровня акустического воздействия объектов техносферы на окружающую среду и человека. Акустическое воздействие техногенных объектов на окружающую среду признано значимым ($L_{общ}$=75 дБ > $L_{ПДУ}$=70 дБА) и его увеличение из-за размещения на этой территории других объектов техносферы или увеличение воздействия уже существующих недопустимо. Рассчитанные значения риска возникновения заболеваний органов слуха, сердечно-сосудистой и нервной систем у человека, усредненные за сутки показывают его невысокое значение $\overline{R_t^{A_{экв}}} = 0{,}0183$, но при более длительном акустическом воздействии риск возникновения заболеваний будет расти. Основываясь на проведенном исследовании можно сказать, что акустическое воздействие объектов техносферы вредно воздействует на естественную экосистему (окружающую среду) и функциональное состояние организма человека. Следовательно, необходимы природоохранные и лечебно-профилактические мероприятия направленные на уменьшение акустического воздействия.

**Ключевые слова:** шум, акустическое воздействие, предельно допустимый уровень, риск для биоты, риск для здоровья человека, оценка риска, окружающая среда, функциональное состояние организма человека, приведенный индекс риска.

# INVESTIGATION OF THE ENVIRONMENTAL AND HUMAN IMPACT OF INDUSTRIAL NOISE

©The Author(s) 2024

**MISHINA Kristina Dmitrievna,** postgraduate student
*Penza State University*
*(440026, Russia, Penza, Krasnaya Street, 40, e-mail: kristina_mishina_1998@mail.ru)*
**BEZBORODOVA Oksana Evgenievna**, doctor of technical sciences, docent,
head of the department «Technosphere Safety» Polytechnic Institute
*Penza State University*
*(440026, Russia, Penza, Krasnaya Street, 40, e-mail: oxana243@yandex.ru)*
**BODIN Oleg Nikolaevich,** doctor of technical sciences, professor,
professor of the department «Technical quality management»
*Penza State Technological University*
*(440039, Penza, Baidukova proezd/Gagarin Street, 1a/11, bodin_o@inbox.ru)*
**KAMARDINA Natalya Vladlenovna,** candidate of technical sciences,
docent of the department «Technosphere Safety» Polytechnic Institute
*Penza State University*
*(440026, Russia, Penza, Krasnaya Street, 40, e-mail: alisa-melafon@mail.ru)*

**Abstract.** The development of society has led to an increase in the number of industrial enterprises, motor transport and urban growth and, as a consequence, to an increase in objects that have an acoustic impact on the environment and humans. Recently, acoustic impact has been associated with the problem of ensuring environmental safety. Acoustic exposure leads to diseases of the hearing organs, cardiovascular and nervous systems, mental disorders, lack of sleep and impaired coordination in humans. When distributed in the environment, acoustic impact disrupts normal processes in flora and fauna. To determine and assess the level of acoustic impact, noise levels in natural ecosystems, places of work and residence of people are calculated and the risk of occurrence is determined. The paper presents the results of determining and assessing the noise level from technosphere objects, calculating the risk of diseases of the hearing organs, cardiovascular and nervous systems in humans, and analyzes the influence of acoustic exposure on the environment. Based on the conducted research, we can say that the acoustic impact of technosphere objects has a harmful effect on the natural ecosystem (environment) and the functional state of the human body. Consequently, environmental and therapeutic and preventive measures aimed at reducing the acoustic impact are necessary.

**Keywords:** noise, acoustic impact, maximum permissible level, risk to biota, risk to human health, risk assessment, environment, functional state of the human body, reduced risk index.

*Мишина К.Д. Исследование уровня воздействия на окружающую среду и человека производственного шума/ К.Д. Мишина, О.Е. Безбородова, О.Н. Бодин, Н.В. Камардина // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 2(66). – С. 196-203. – EDN: ONUOSY.*

**Введение.** Активное использование результатов научно-технических исследований в промышленности влечет за собой рост количества и качества факторов риска, оказывающих негативное воздействие на естественные экосистемы (окружающую среду) и функциональное состояние организма человека. Многочисленные промышленные предприятия, транспортные средства и механические устройства являются источниками акустических колебаний, которые входят в тройку самых опасных экологических загрязнений в мире [1].

Шум (акустические колебания) – это неприятный или раздражающий звук, который вызывает отрицательные изменения состояния систем и органов человека, составляющих биосферы и, как минимум, мешающий восприятию информативных сигналов [2, 3]. В свою очередь под акустическим загрязнением окружающей среды понимается уровень звука больший, чем уровень звука в естественных экосистемах или резкий скачек шумовых характеристик. По данным Всемирной Организации Здравоохранения (ВОЗ) акустическое загрязнение составляет примерно 75% загрязнений на планете [4].

Согласно исследованиям ВОЗ наиболее благоприятный уровень звука для организма человека имеет уровень звука 20÷55 дБ. Шум в районе 130 дБ вызывает болезненные ощущения, а свыше 150 дБ является невыносимым для восприятия человека.

Наибольший вклад в общее акустическое загрязнение окружающей среды вносят объекты техносферы: автомобильный, железнодорожный транспорт (уровень шума 60-100 дБ), производственные объекты (уровень шума 70-115 дБ) [2, 5-7].

По данным ВОЗ длительное акустическое воздействие в диапазоне от 65 до 90 дБ оказывает раздражающее действие на нервную систему, повышает утомляемость, уровень усталости и агрессии. Продолжительное воздействие шума приводит к хроническим заболеваниям системы слуха и к глухоте, к заболеваниям сердечно-сосудистой системы: повышению артериального давления, изменению биохимического состава крови; выявлено, что заболевания желудочно-кишечного тракта чаще всего встречаются у людей, которые живут и работают в зоне высокой акустической нагрузки. Существуют данные, свидетельствующие об ответственности произ-

водственного шума за 15% случаев профзаболеваний [3, 8-17].

Акустическое загрязнение вызывает не только изменения функционального состояния организма человека, но также сказывается на нормальном протекании процессов в биосфере. Высокий уровень шума приводит к повышению утомляемости и нервозности у животных, к их дезориентации в пространстве: пчелы при звуке реактивного двигателя теряются в пространстве, морские млекопитающие из-за гидролокаторов теряют ориентацию в пространстве и могут выбрасываться на берег, из-за заглушения естественного шума происходит сдвижение ареалов их обитания. Доказано, что растения, которые находятся в зоне постоянного акустического воздействия, выделяют листьями большее количество влаги и быстрее засыхают [1, 18, 19].

Таким образом, контроль распространения акустического воздействия в естественных экосистемах – это насущная проблема обеспечения экологического благополучия.

Целью проведения работы является выявление динамики изменения акустического загрязнения в населенном пункте с различной структурой застройки (жилой массив, открытая территория, парковая зона) и влияние этой динамики на биологические объекты (человек, растения, насекомые и пр.) в зависимости от расстояния от источника акустического загрязнения.

Для этого решается следующая совокупность задач:

– определение уровня акустического загрязнения, источниками которого являются два промышленных предприятия №№1,2; автострада;

– выявление динамики изменения акустического загрязнения от каждого объекта если шум проходит по территории с различной структурой застройки;

– выявление степени воздействия акустического загрязнения на системы и органы человека и элементы окружающей среды;

– оценить полученные результаты с точки зрения обеспечения экологического благополучия в территориальной техносфере.

**Методология.** Источниками акустического воздействия являются промышленные предприятия, автомобильный и железнодорожный транспорт, а также жилые комплексы. Способы оценки акустического воздействия зависит от объекта, на который направлено акустическое воздействие. В таблице 1 представлены условия оценки акустического воздействия [20, 21].

*Таблица 1 – Условия оценки акустического воздействия*

<table>
<tr><td rowspan="2">Объекты воздействия акустического фактора раздражения</td><td colspan="3">Органы и системы организма человека</td><td colspan="2" rowspan="2">Окружающая среда (биота)</td></tr>
<tr><td>Органы слуха</td><td>Нервная система</td><td>Сердечно-сосудистая система</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Место проведения измерения</td><td colspan="3">Рабочее место</td><td colspan="2" rowspan="2">Естественная среда обитания</td></tr>
<tr><td colspan="3">Жилое помещение</td></tr>
<tr><td>Время проведения измерения</td><td colspan="3">Днем</td><td colspan="2">Ночью</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Оцениваемые параметры</td><td colspan="3">Уровень шума днем и ночью</td><td colspan="2">Уровень шума днем</td></tr>
<tr><td colspan="3">Эквивалентный уровень средневзвешенного шума</td><td colspan="2" rowspan="2">Уровень шума ночью</td></tr>
<tr><td colspan="3">Риск нарушения слуха, сердечно-сосудистой и нервной систем</td></tr>
</table>

Оценку риска изменения состояния органов слуха, нервной и сердечно-сосудистой систем по воздействием акустического шума осуществляют согласно [22, 23], рассчитывая эквивалентный уровень шума, характеризующий степень воздействия на функциональное состояние организма человека:

$$L_{DN} = 10 \cdot lg \frac{1}{24} \cdot (16 \cdot 10^{\frac{LAday}{10}} + 8 \cdot 10^{\frac{LAnight+10}{10}}) \quad (1)$$

где $L_{DN}$ – эквивалентный уровень шума без учета частотного состава, дБА; $L_{Aday} = L_{Aeq}$, 16 – эквивалентный уровень шума днем, пересчитанный на 16 часовую продолжительность воздействия, дБА; $L_{Anight} = L_{Aeq}$, 8 – эквивалентный уровень шума ночью, пересчитанный на 8 часовую продолжительность воздействия, дБА.

Для определения риска изменения функционального состояния организма человека (воздействие на слуховой аппарат, сердечно-сосудистую систему, нервную систему) используют систему уравнений:

$$\begin{cases} R_{t+1}^{A_{сл}} = R_t^{A_{сл}} + \left[0{,}0118 \cdot R_t^{A_{сл}} + 0{,}001 \cdot \left(\frac{L_{den,t} \cdot (1 - R_t^{A_{сл}})}{50} - 1\right)\right] \cdot C \\ R_{t+1}^{A_{сс}} = R_t^{A_{сс}} + \left[0{,}052 \cdot R_t^{A_{сс}} + 0{,}015 \cdot \left(\frac{L_{den,t} \cdot (1 - R_t^{A_{сл}})}{58{,}5} - 1\right)\right] \cdot C \\ R_{t+1}^{A_{нс}} = R_t^{A_{нс}} + \left[0{,}0074 \cdot R_t^{A_{нс}} + 0{,}016 \cdot \left(\frac{L_{den,t} \cdot (1 - R_t^{A_{сл}})}{43} - 1\right)\right] \cdot C \end{cases} \quad (2)$$

где $R_t^{A_i}$ – риск изменения функционального состояния какой либо системы организма человека (слухового аппарата, сердечно-сосудистой системы, нервной системы) в момент времени $t$; ($R_t$ при $t=0$): $R_0^{A_{сл}} = 0{,}023$; $R_0^{A_{сс}} = 0{,}007$; $R_0^{A_{нс}} = 0{,}02855$ – начальные уровни риска для здоровья человека; $R_{t+1}^{A_i}$ – риск изменения функционального состояния какой либо системы организма человека (слухового аппарата, сердечно-сосудистой системы, нервной системы) в момент времени $t+1$ (зависит от $C$); $R_t^{A_{сл}}$ – риск изменения функционального состояния слухового аппарата на момент времени $t$; $R_t^{A_{сс}}$ – риск изменения функционального состояния сердечно-сосудистой системы на момент времени $t$; $R_t^{A_{нс}}$ – риск изменения

функционального состояния нервной системы на момент времени t; $L_{den,t}$ – усредненный за сутки уровень шума на момент времени *t*, дБА; *C* – коэффициент, учитывающий время воздействия шума (устанавливают эмпирически).

Рассчитанные величины рисков дают возможность оценить тяжесть заболевания, результаты его лечения, а так же степень повреждения функциональных систем организма. По формулам (2) возможно провести определение значений риска для здоровья в интересующий момент времени.

Для расчета характеристики уровня риска определяют приведенный индекс риска заболеваний органов слуха, нервной и сердечно-сосудистой систем как:

$$\widetilde{R_t^{A_i}} = \frac{\Delta R_t^{A_i}}{1 - R_t^{A_i/\phi}} \quad (3)$$

где $\widetilde{R_t^{A_{cog}}}$ – приведенный индекс риска изменения функционального состояния какой либо системы организма человека (слухового аппарата, сердечно-сосудистой системы, нервной системы); $\Delta R_t^{Ai}$ – дополнительный риск изменения функционального состояния какой либо системы организма человека в момент времени *t;* $R_t^{Ai/\phi}$ – риск изменения функционального состояния какой либо системы организма человека без акустического воздействия в момент времени *t*.

Для комплексной оценки риска изменения функционального состояния организма человека при акустическом воздействии с учетом увеличения риска за счет временного эмпирического коэффициента приведенный индекс риска здоровью определяют как:

$$\widetilde{R_t^{A_{con}}} = \frac{\Delta R_t^{A_{con}}}{1 - R_t^{A_{con/\phi}}} \quad (4)$$

где $\widetilde{R_t^{A_{con}}}$ – приведенный индекс риска изменения функционального состояния организма человека при акустическом воздействии в момент времени *t*; $\Delta R_t^{Aсов}$ – дополнительный совокупный риск изменения функционального состояния организма человека при акустическом воздействии на момент времени *t;* $R_t^{Aсов/\phi}$ – совокупный риск изменения функционального состояния организма человека без акустического воздействия в момент времени *t.*

Рассчитанное значение $R_t^{Aсов}$ анализируем по оценочной шкале, разработанной для приведенного индекса риска (табл. 2) и делаем вывод об опасности акустического воздействия для организма человека.

*Таблица 2 – Количественные и качественные характеристики значений приведенного индекса риска*

| № п/п | Количественная характеристика индекса риска, $R_t^{Aсов}$, доли единицы | Качественная характеристика индекса риска |
|---|---|---|
| 1 | $R_t^{Aсов} \le 0,05$ | Малый (пренебрежительно) – приемлемый |
| 2 | $0,05 \le R_t^{Aсов} < 0,35$ | Умеренный – неприемлемый |
| 3 | $0,35 \le R_t^{Aсов} < 0,6$ | Высокий – неприемлемый |
| 4 | $R_t^{Aсов} \ge 0,6$ | Очень высокий – неприемлемый |

Для исследования влияния акустического воздействия на окружающую среду проводят расчет уровня звука в данной точке от различных источников по формуле (5) и затем сравнивают полученные значения с ПДУ:

$$L_{общ} = 10 \cdot lg(10^{0,1L1} + 10^{0,1L2} + .. + 10^{0,1Ln}) \quad (5)$$

где $L_1$, $L_2$, ... $L_n$ – уровни звука в расчетной точке от различных источников, которые определяются по формуле:

$$L_i = L_{ai} + 10 \cdot \lg\left(\frac{1}{S_i} + \frac{4}{B}\right) \quad (6)$$

где $L_{ai}$ – уровень звука источника шума, дБА; $S_i$ – площадь воображаемой поверхности, окружающей источник шума и проходящей через исследуемую точку, м$^2$: $S_i = \pi \cdot r^2$; $r_i$ – удаленность акустического центра источника шума от исследуемой точки, м; *B* – постоянная помещения или местности, где находится объект, на который воздействует шум, м$^2$ [24, 25]. Характеристикой оценивания непостоянного шума является эквивалентный уровень звука, измеряемый в дБА [26].

**Результаты.** Проведены измерения уровней акустического воздействия на границах СЗЗ трех объектов техносферы (промышленного предприятия № 1; промышленного предприятия № 2; автодороги). В качестве места расположения биоты рассмотрена парковая зона в черте города, находящаяся в пределах акустического воздействия этих объектов техносферы. Между объектами техносферы и парковой зоной расположен жилой массив. Парковая зона, в данном случае, выступает как звукопоглощающая среда, обеспечивая некоторое снижение акустического загрязнения (пропорционально коэффициенту снижения уровня звука ($\beta$, дБА/м) [27].

Измерения уровня акустического воздействия проведены в дневное время, когда на промышленных предприятиях осуществлялась работа и загруженность автомобильной дороги максимальна.

Исходными данными для расчета риска для систем и органов человека являются результаты контрольных замеров уровней шума выполненные на границах СЗЗ исследуемых объектов. Измерения проведены в дневное (с 6:00 до 22:00) и ночное время (с 22:00 до 6:00), с учетом того, что промышленные предприятия работают в одну смену и ночью не оказывают акустического воздействия. В этом случае парковой зоны на пути распространения акустического воздействия нет, поэтому расчет изменения уровня акустического воздействия проведен без учета звукопоглощения.

С использованием результатов контрольных замеров акустического загрязнения рассчитана динамика изменения этого параметра в окружающей среде.

Полученные данные представлены в таблице 3.

Согласно [28] ПДУ акустического воздействия для территорий парковой зоны находящейся вблизи жилых застроек составляет 70 дБА.

Для анализа тенденции временного ряда акустического воздействия на окружающую среду были получены математические модели в виде полиномиальных функций с использованием аппроксимации эмпирических автокорреляционных функций, которые характеризуют зависимость их значений от порядка коэффициента автокорреляции.

Построение аппроксимирующей функции осуществлялось методом кубической аппроксимации (табл. 4).

Динамика акустического воздействия на окружающую среду представлена на рисунке 1.

По полученным в ходе измерений данным проведены расчеты уровня акустического воздействия на организм человека в жилой зоне. Результаты измерений и их обработки приведены в таблице 5.

Согласно [28] предельно допустимый уровень акустического загрязнения в местах проживания людей днем не должен превышать 55 дБА, ночью – 45 дБА.

Построение аппроксимирующей функции осуществлялось методом кубической аппроксимации (табл. 6).

Динамика акустического воздействия на организм человека представлена на рисунке 2.

Для детализации последствий акустического загрязнения организма человека в соответствии с [22] по формулам (2) и (3) рассчитаны значения риска для здоровья человека, значения которого приведены в таблице 7.

*Таблица 3 – Фрагмент определения динамики изменения акустического загрязнения при распространении в окружающей среде*

| № п/п | Источники акустического воздействия | $L_{ai}$, дБА | $r_{общ}$, м | $r_{л.м.}$, м | $r_{св.пр.}$, м | β, дБА/м | B, м$^2$ | $L_i$, дБА | $L_{общ}$, дБА |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Промышленное предприятие №1 (на границе СЗЗ) | 71 | 300 | 150 | 150 | 0,25 | 20 | 62 | 75 |
| 2 | Промышленное предприятие №2 (на границе СЗЗ) | 83 | 250 | 150 | 100 | | | 74 | |
| 3 | Автомобильная дорога | 73 | 100 | 90 | 10 | | | 64 | |

Примечание: $r_{общ}$ – расстояние от источника акустического воздействия до точки измерения, в том числе протяженность парковой зоны ($r_{л.м.}$) и протяженность свободного пространства ($r_{св.пр.}$), м.

*Таблица 4 – Результаты аппроксимации полученных временных рядов акустического воздействия на окружающую среду методом кубической аппроксимации*

| Промышленное предприятие №1 (на границе СЗЗ) | Промышленное предприятие №2 (на границе СЗЗ) | Автомобильная дорога |
|---|---|---|
| $y=0{,}00\cdot x^3-0{,}00\cdot x^2-0{,}03\cdot x+71{,}0$ | $y=0{,}00\cdot x^3-0{,}00\cdot x^2-0{,}09\cdot x+87{,}00$ | $y=-0{,}00\cdot x3+0{,}00\cdot x^2-0{,}41\cdot x+72{,}72$ |
| коэффициент корреляции – 0,99 | коэффициент корреляции – 0,99 | коэффициент корреляции – 0,98 |
| коэффициент детерминации – 0,98 | коэффициент детерминации – 0,98 | коэффициент детерминации – 0,97 |
| средняя ошибка аппроксимации,% – 0,61 | средняя ошибка аппроксимации,% – 0,46 | средняя ошибка аппроксимации,% – 0,76 |
| Примечание: $x$ – расстояние от источника акустического воздействия, м; $y$ – уровень акустического воздействия, дБА. | | |

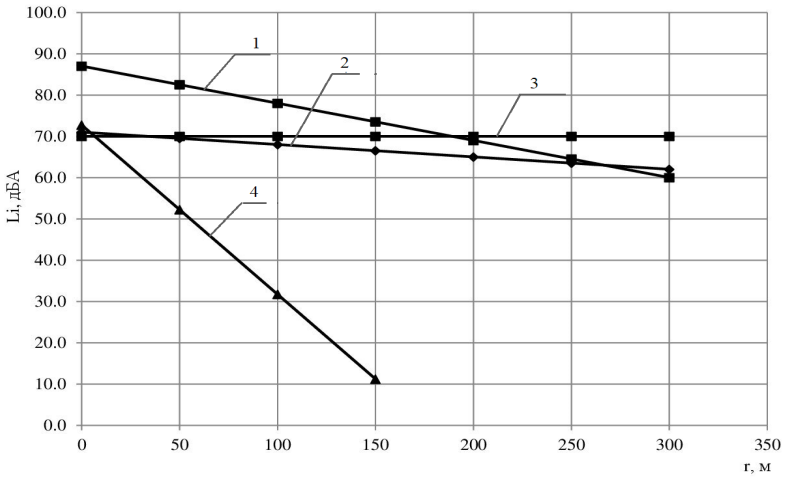



*Рисунок 1 – Динамика акустического воздействия на окружающую среду:*
*1 – акустическое воздействие промышленного предприятия №2;*
*2 – акустическое воздействие промышленного предприятия №1; 3 – предельно допустимый уровень акустического воздействия для территорий парковой зоны; 4 – акустическое воздействие автодороги*

*Таблица 5 – Фрагмент результатов измерений и оценки акустического воздействия на организм человека в жилой зоне*

| № п/п | Источники шума | $L_{ai}$, дБА | | $r_i$, м | B, м² | $L_i$, дБ | | $L_{Aday}$, дБ | $L_{Anight}$, дБ | $L_{DN}$, дБА |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Днем | Ночью | | | Днем | Ночью | | | |
| 1 | Промышленное предприятие №1 (на границе санитарно-защитной зоны) | 71 | – | 100 | 20 | 64 | – | 77 | 62 | 76 |
| 2 | Промышленное предприятие №2 (на границе санитарно-защитной зоны) | 83 | – | 120 | | 76 | – | | | |
| 3 | Автомобильная дорога | 73 | 69 | 70 | | 66 | 62 | | | |

*Таблица 6 – Результаты аппроксимации полученных временных рядов акустического воздействия на организм человека методом кубической аппроксимации*

| Промышленное предприятие №1 (на границе санитарно-защитной зоны) (днем) | Промышленное предприятие №2 (на границе санитарно-защитной зоны) (днем) |
|---|---|
| $y=-0{,}00\cdot x^3+0{,}00\cdot x^2-0{,}18\cdot x+82{,}96$ | $y=-0{,}00\cdot x^3+0{,}00\cdot x^2-0{,}41\cdot x+77{,}71$ |
| коэффициент корреляции – 1 | коэффициент корреляции – 1 |
| коэффициент детерминации – 1 | коэффициент детерминации – 1 |
| средняя ошибка аппроксимации,% – 0,16 | средняя ошибка аппроксимации,% – 0,01 |
| Автомобильная дорога | |
| днем | ночью |
| $y=-0{,}00\cdot x^3+0{,}03\cdot x^2-2{,}61\cdot x+166{,}56$ | $y=-0{,}00\cdot x^3+0{,}01\cdot x^2-1{,}15\cdot x+119{,}17$ |
| коэффициент корреляции – 1 | коэффициент корреляции – 0,99 |
| коэффициент детерминации – 0,99 | коэффициент детерминации – 0,99 |
| средняя ошибка аппроксимации,% – 0,28 | средняя ошибка аппроксимации,% – 0,89 |

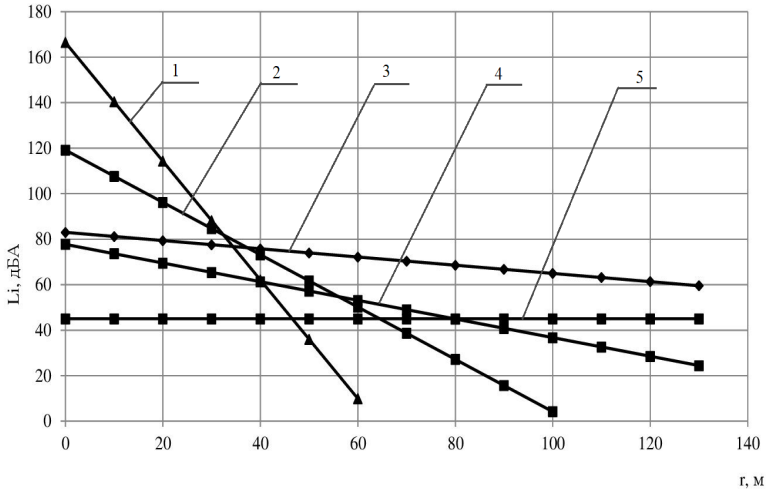



*Рисунок 2 – Динамика акустического воздействия на организм человека:*
*1 – акустическое воздействие автодороги днем; 2 – акустическое воздействие автодороги ночью;*
*3 – акустическое воздействие промышленного предприятия №1; 4 – акустическое воздействие промышленного предприятия №2; 5 – предельно допустимый уровень акустического воздействия для жилых комнат квартир ночью*

*Таблица 7 – Риск для здоровья человека при воздействии на него средневзвешенного суточного шума с уровнем $L_{DN}$ = 76 дБА.*

| № | Параметр | Значение риска | |
|---|---|---|---|
| | | факт. | нормативное [22] |
| | | | низкий ≤0,05 |
| 1 | Риск заболевания слуха без акустического воздействия (фон) | $2{,}3\cdot10^{-2}$ | + |
| 2 | Риск заболевания сердечно-сосудистой системы без акустического воздействия (фон) | $0{,}7\cdot10^{-2}$ | + |
| 3 | Риск заболевания нервной системы без акустического воздействия (фон) | $2{,}9\cdot10^{-2}$ | + |
| 4 | Риск заболевания слуха без акустического воздействия | $2{,}3\cdot10^{-2}$ | + |
| 5 | Риск заболевания сердечно-сосудистой системы без акустического воздействия | $7{,}0\cdot10^{-3}$ | + |
| 6 | Риск заболевания нервной системы без акустического воздействия | $2{,}9\cdot10^{-2}$ | + |
| 7 | Приведенный индекс риска заболеваний органов слуха при акустическом воздействии | $1{,}5\cdot10^{-3}$ | + |
| 8 | Приведенный индекс риска заболеваний сердечно-сосудистой системы при акустическом воздействии | $2{,}0\cdot10^{-4}$ | + |
| 9 | Приведенный индекс риска заболеваний нервной системы при акустическом воздействии | $1{,}7\cdot10^{-2}$ | + |
| 10 | Индекс риска для систем и органов (слух, сердце, нервы) организма человека $\widetilde{R_t^{A_{com}}}$ | $1{,}8\cdot10^{-2}$ | + |

В таблице 2 [22] приведена оценочная шкала качественного и количественного анализа риска по индексу $\widetilde{R_t^{A_{con}}}$. В соответствии с этой оценочной шкалой совокупный приведенный индекс риска для систем и органов человека при акустическом воздействии $\widetilde{R_t^{A_{con}}}$ является низким, почти не влияющим на здоровье населения, проживающего в исследуемом районе. В этом случае специалисты рекомендуют проводить выборочный мониторинг акустическом воздействии. Определение и анализ изменения риска следует проводить не реже одного раза в пять лет, а также в случае строительства в исследуемом районе новых объектов техносферы являющихся источниками акустического воздействия или строительства нового жилого района.

**Обсуждение.** Полученные данные по акустическому загрязнению окружающей среды и организма человека явно демонстрируют превышение фактического уровня шума по отношению к норме в источнике образования (предприятия №№1,2, автострада) [28]. После прохождения расстояния до расчетной точки уровень звука уменьшается и только от источника – промышленное предприятие № 2, остался превышающим предельно допустимый уровень. Но полученное значение общего уровня звука от всех трех источников на окружающую среду (биоту) превышает предельно допустимый уровень ($L_{общ}$ =75 дБ > $L_{ПДУ}$ =70 дБА). На основе полученных результатов, можно сделать вывод, что дальнейшее влияние акустического шума в данных пределах от рассматриваемых источников приведет к негативным последствиям для окружающей среды (биоты), возможно гибель растительный массивов и некомфортное существование представителей животного мира.

При рассмотрении полученных данных влияния эквивалентного уровня звука от источников шума на организм человека видно, что эквивалентный уровень звука днем (шестнадцатичасовое воздействие) и ночью (восьмичасовое воздействие) не соответствуют нормативным значениям ($L_{Aday}$=77 дБ > $L_{D,ПДУ}$ =55 дБА; $L_{Anight}$ =62 дБ > $L_{N,ПДУ}$ =45 дБА).

Риск изменения состояния систем и органов человека в результате акустического загрязнения, усредненный за сутки, не превышает нормативных значений ($\widetilde{R_t^{A_{con}}}$=0,0183). Однако, учет временного фактора продолжительностью более одних суток приведет к накоплению риска для здоровья.

Основываясь на проведенном исследовании, можно сказать, что акустическое воздействие объектов техносферы (промышленное предприятие №1, промышленное предприятие №2, автодорога) вредно воздействует на естественную экосистему (окружающую среду) и функциональное состояние организма человека. Следовательно, необходимы природоохранные и лечебно-профилактические мероприятия направленные на уменьшение акустического воздействия.

**Выводы.** Проведенные исследования уровня воздействия на окружающую среду и человека производственного шума показали, что, несмотря на соответствие уровня шума от каждого объекта техносферы отдельно нормативам, на границе СЗЗ в зоне жилой застройке и в лесопарковой зоне их совокупный уровень шума превышает нормы или находится на ее верхней границе. При этом возникает риск приобретения заболеваний систем и органов человека (слуха, сердце, нервы).

Полученные результаты могут быть использованы для зонирования и оценки состояния территории города по величине риска для здоровья человека и состояния окружающей среды возникающего в результате акустического воздействия. Оценка риска постоянного нахождения человека и элементов окружающей среды в зоне акустического загрязнения выполнена в соответствии с требованиями [29].

Полученные значения динамики акустического загрязнения в городской среде с различными видами застройки позволят обоснованно выбирать места для размещения объектов с постоянным и непостоянным пребыванием людей и планировать размещение парковых зон в городе.

Результаты исследования могут быть использованы лицами, принимающими решения по обеспечению социально-гигиенического благополучия населения при выборе и осуществлении природоохранных мероприятий. Эти мероприятия могут сочетать архитектурно-планировочные, лечебно-профилактические и технические составляющие, направленные на снижение риска для элементов окружающей среды и здоровья человека.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Зинкин В.Н. Негативные последствия промышленного и транспортного шума на окружающую среду и население // Материалы XII международной научной конференции «Системный анализ в медицине» (САМ 2018) / под общ. ред. В.П. Колосова. Благовещенск, 2018. – С. 177-181.

2. Ереженова Н.Б. Влияние шума на организм человека // Мировая наука. – 2022. – №7 (64). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-shuma-na-organizm-cheloveka-1 (дата обращения: 30.01.2024).

3. Мишина К.Д., Безбородова О.Е. Влияние автотранспорта на функциональное состояние человека. Перспективные направления развития автотранспортного комплекса: сборник статей XVII Международной научно - практической конференции / Пензенский государственный университет [и др.]; под ред. Салмина В.В.– Пенза: Пензенский государственный аграрный университет 2023. – С. 133-137.

4. Минаева В.В., Гапоненко А.В. Влияние шума на организм человека // Международный студенческий научный вестник. – 2015. – № 3-1. – С. 56-58.

5. Литвинов Ф.Б. Влияние городского шума на здоровье человека // Материалы XI Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум» URL: <a href="https://scienceforum.ru/2019/article/2018011511">https://scienceforum.ru/2019/article/2018011511 (дата обращения: 30.01.2024).

6. Ишамятова Ирина Хафисовна, Жукова Наталья Владимировна, Чабанов Антон Геннадьевич. Экологические показатели устойчивого развития земель городов пензенской области // Московский экономический журнал. – 2022. – №3. – С. 499-509. URL: https://qje.su/rekreacia-i-turizm/moskovs-

kij-ekonomicheskij-zhurnal-3-2022-66/.

7. Эру Мариева, Браубах М., Дрмак Д., Король Н., Пауновик Е., Застенская И. Краткий обзор текущей деятельности Европейского регионального бюро воз относительно воздействия шума окружающей среды на здоровье // Гигиена и санитария. – 2014. – №5. – С. 25-28.

8. Рахимов Х.Р. Изучение влияния шума на организм человека // Международный школьный научный вестник. – 2018. – № 5-2. – С. 284-292.

9. Сарчук Е.В., Лебедева А.М., Узбекова Л.Д. Шумовое загрязнение как патогенный фактор для здоровья человека // StudNet. 2020. – №4. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/shumovoe-zagryaznenie-kak-patogennyy-faktor-dlya-zdorovya-cheloveka (дата обращения: 30.01.2024).

10. Пыко А.В., Мукалова О.А., Пыко А.А. Влияние транспортного шума и загрязнения воздуха на метаболическую и сердечно-сосудистую заболеваемость и смертность // Неотложная кардиология и кардиоваскулярные риски. – 2018. – Т. 2. – № 1. – С. 270-279.

11. Babisch W. Updated exposure-response relationship between road traffic noise and coronary heart diseases: A meta-analysis. Noise Health. 2014;16(68):1-9. – DOI: 10.4103/1463-1741.127847.

12. Andersson EM, Wgren M, Molnбr P, Segersson D, Rosengren A, Stockfelt L. Road traffic noise, air pollution and cardiovascular events in a Swedish cohort. Environ Res. 2020;185:109446. – DOI: 10.1016/j.envres.2020.109446.

13. Christensen JS, Raaschou-Nielsen O, Tjшnneland A, et al. Long-term exposure to residential traffic noise and changes in body weight and waist circumference: A cohort study. Environ Res. 2015;143(Pt A):154-161. – DOI: 10.1016/j.envres.2015.10.007.

14. Eriksson C, Bodin T, Selander J. Burden of disease from road traffic and railway noise – a quantification of healthy life years lost in Sweden. Scand J Work Environ Health. 2017;43(6):519-525. – DOI: 10.5271/sjweh.3653.

15. Basner M, McGuire S. WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A systematic review on environmental noise and effects on sleep. Int J Environ Res Public Health. 2018;15(3):519. – DOI: 10.3390/ijerph15030519.

16. Zaitseva N, May I, Koshurnikov D, Balashov S. Evolution of the health disorders risk in the population under development of urbanized territories. Akustika. 2021;39:201-206. – DOI: 10.36336/akustika202139199.

17. Heritier, H., Vienneau, D., Foraster, M., Eze, I.C., Schaffner, E., de Hoogh, K., et al., 2019. A systematic analy-sis of mutual effects of transportation noise and air pollution exposure on myocardial infarction mortality: a nationwide cohort study in Switzerland. Eur. Heart J. 40 (7). – P. 598-603.

18. Koshurnikov D. Acoustic modeling for the tasks of hygienic assessment of the urban environment. Akustika. 2019;34: 37-41.

19. Fredianelli, L., Carpita, S., Licitra, G., 2019. A procedure for deriving wind turbine noise limits by taking into ac-count annoyance. Sci. Total Environ. 648. – P. 728-736.

20. Подколзин П.Л., Преликова Е.А. Роль шумовой карты в создании комфортной среды проживания // Проблемы обеспечения безопасности (Безопасность 2020): Материалы II Международной научно-практической конференции, Уфа, 08 апреля 2020 года. Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет. – 2020. – С. 238-241.

21. Май Ирина Владиславовна, Цинкер М.Ю., Чигвинцев В.М., Кошурников Д.Н. Подход к оценке риска возникновения нарушения здоровья под воздействием шума // ЗНиСО. – 2011. – №10. – С. 10-12.

22. Методические рекомендации. 2.1.10.0059-12 Оценка риска здоровью населения от воздействия транспортного шума.

23. Алексеев Вадим Борисович, Май Ирина Владиславовна, Клейн Светлана Владиславовна, Кошурников Дмитрий Николаевич. Транспортный шум как фактор риска здоровью населения и установления ограничений использования земельных участков городских и сельских поселений // ЗНиСО. – 2022. – №10. – С. 25-32.

24. Шумилин, А.Д. Исследование транспорного шума на улицах города Пенза / А.Д. Шумилин, Н.Н. Вершинин, Л.А. Авдонина // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 3 (15). – С. 103-109. – DOI: 10.21685/2307-4205-2016-3-16.

25. Хусаинов И.Г. Математическое моделирование защиты объектов от шума // Современная математика и ее приложения: материалы международной научно-практической конференции, Уфа, 18-20 мая 2017 года. Уфа: Башкирский государственный университет, Стерлитамакский филиал, 2017. – С. 367-372.

26. ГОСТ 23337–2014 Шум. Методы измерения шума на территориях жилой застройки и в помещениях жилых и общественных зданий (с Поправками, с Изменением N 1).

27. МУК 4.3.2194-07. Контроль уровня шума на территории жилой застройки, в жилых помещениях и общественных зданиях и помещениях.

28. СаНПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.

29. МР 2.1.10.0059-12. 2.1.10. Состояние здоровья населения в связи с состоянием окружающей среды и условиями проживания населения оценка риска здоровью населения от воздействия транспортного шум. Методические рекомендации.

*Статья поступила в редакцию 04.04.2024*
*Статья принята к публикации 17.06.2024*

УДК 331.453
EDN: VYKHXR

# МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОБОСНОВАНИЮ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ПЕРСОНАЛА МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОГО КОМПЛЕКСА

© Автор(ы) 2024

SPIN: 5251-635
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, 21 линия, д. 2, e-mail: korshunov_gi@pers.spmi.ru)*

SPIN: 3162-9667
AuthorID: 1069829
ORCID: 0000-0001-7573-3864
ResearcherID: GVU-1908-2022
ScopusID: 57211297562

**КРАСНОУХОВА Дарья Юрьевна**, аспирант кафедры «Безопасности производств»
*Санкт-Петербургский горный университет*
*(199106, Россия, Санкт-Петербург, 21 линия, д. 2, e-mail: darya.krasnouhova@yandex.ru)*

SPIN: 2126-5766
AuthorID: 519104
ORCID: 0000-0003-3795-1005
ResearcherID: Y-8728-2018
ScopusID: 57206722475

**ТУМАНОВ Максим Валентинович,** кандидат медицинских наук,
доцент кафедры «Безопасности производств»
*Санкт-Петербургский горный университет*
*(199106, Россия, Санкт-Петербург, 21 линия, д. 2, e-mail: tumanov_mv@pers.spmi.ru)*

**Аннотация.** Остается актуальной проблема воздействия вредных и опасных производственных факторов на рабочих местах. Как показывает статистика, к наиболее опасным относится горная промышленность. Несмотря на снижение числа работников, занятых на работах с вредными и опасными производственными факторами, данный показатель остается высоким. Современные исследования позволяют провести комплексную оценку проблемы, в результате чего было выявлено влияние вредных производственных факторов на поведение и когнитивные процессы работников. Таким образом, необходимо оценивать совокупное воздействие производственных и психофизиологических фактором для принятия управленческих решений в области безопасного ведения работ. В целях разработки методики совокупной оценки проводится исследование психофизиологических параметров и оценка их влияния на поведение индивидуумов в различных условиях. Исследование проводится с использованием наиболее доступных методик, что позволит проводить аналогичный анализ в производственных условиях перед и после проведения работ. Динамика психоэмоционального состояния позволяет оценить изменение работоспособности в течение смены, накопление усталости и снижение внимания, в то время как оценка физиологических показателей характеризует интенсивность нагрузки и позволяет определить «цену» деятельности. Сочетания изучаемых параметров позволяют делать выводы об уровне подготовленности персонала и склонности к риску при выполнении работ.

**Ключевые слова:** безопасное поведение, психофизиологические параметры, риск ошибочных действий, факторы производственной среды и трудового процесса, травматизм, оценка профессиональных рисков, оценка совокупного воздействия.

# METHODOLOGICAL APPROACHES TO SUBSTANTIATING A COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE RELIABILITY OF THE PERSONNEL OF THE MINERAL RESOURCE COMPLEX

© The Author(s) 2024

**KORSHUNOV Gennadiy Ivanovich**, doctor of technical sciences, professor of «Industrial Safety Department»
*Saint-Petersburg Mining University*
*(199106, Russia, Saint-Petersburg, 21st Line, 2, e-mail: korshunov_gi@pers.spmi.ru)*

**KRASNOUKHOVA Darya Yurievna**, post-graduate student «Industrial Safety Department»
*Saint-Petersburg Mining University*
*(199106, Russia, Санкт-Петербург, 21st Line, 2, e-mail: darya.krasnouhova@yandex.ru)*

**TUMANOV Maksim Valentinovich**, ph.d. of medical sciences,
associate professor of «Industrial Safety Department»
*Saint-Petersburg Mining University*
*(199106, Russia, Saint-Petersburg, 21st Line, 2, e-mail: tumanov_mv@pers.spmi.ru)*

**Abstract.** The problem of exposure to harmful and dangerous production factors in the workplace remains urgent. As statistics show, the mining industry is among the most dangerous. Despite the decrease in the number of workers employed in jobs with harmful and dangerous production factors, this indicator remains high. Modern research allows for a comprehensive assessment of the problem, as a result of which the influence of harmful production factors on the conduct and cognitive processes of employees was revealed. Thus, it is necessary to assess the combined impact of industrial and psychophysiological factors for making managerial decisions in the field of safe work. In order to develop a methodology for cumulative assessment, a study of psychophysiological parameters and an assessment of their impact on the behavior of individuals in various conditions is carried out. The study is carried out using the most accessible techniques, which will allow for a similar analysis in production conditions before and after the work. The dynamics of the psychoemotional state allows us to assess the change in performance during the shift, the accumulation of fatigue and a decrease in attention, while the assessment of physiological indicators characterizes the intensity of the load and allows us to determine the "price" of activity. Combinations of the studied parameters allow us to draw conclusions about the level of personnel preparedness and risk tolerance when performing work.

**Keywords:** safe behavior, psychophysiological parameters, risk of erroneous actions, factors of the production environment and labor process, injuries, occupational risk assessment, assessment of cumulative impact.

***Для цитирования:*** *Коршунов Г.И. Методические подходы к обоснованию комплексной оценки надежности персонала минерально-сырьевого комплекса / Г.И. Коршунов, Д.Ю. Красноухова, М.В. Туманов// XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 2(66). – С. 204-209. – EDN: VYKHXR.*

**Введение.** Остается актуальной проблема учета персональных характеристик работников при организации труда. В исследованиях ученых различных стран проводится анализ воздействия факторов производственной среды на психофизиологические возможности работников. Современные методики, применяемые на предприятиях минерально-сырьевого комплекса, не учитывают в полной мере подготовленность работников к реагированию на опасные ситуации или уровень воздействия вредных факторов при выполнении работ. В результате оказываемого воздействия факторов производственной среды и трудового процесса постепенно снижается работоспособность персонала [1], а также внимание и реакция на изменяющиеся условия. В результате к наиболее значимым факторам, влияющим на интенсивность труда, относятся личностные факторы и гигиенические условия труда [2].

Горнодобывающие предприятия располагаются в различных регионах России и имеют особенности в климатических условиях. Температурные условия характеризуются уровнем энергозатрат работников, которые непосредственно влияют на выносливость и скорость утомления, таким образом, при неправильном отведении тепла [3] или переохлаждении увеличивается риск развития профессиональных заболеваний и получения травм. Также при применении средств индивидуальной защиты ситуация может усугубляться [4].

Воздействие шума оказывает влияние на безопасное поведение шахтеров и способствует реализации несчастных случаев. По результатам исследований установлено, что шум, превышающий нормативные значения, оказывает значительное влияние на физиологические и психологические параметры [5, 6]. В результате чего снижаются такие показатели, как скорость восприятия и реакции, ухудшается внимание [7, 8]. Таким образом, при сверхнормативном воздействии шума риск реализации опасных событий или несчастных случаев значительно увеличивается.

В то же время значительное влияние на работоспособность оказывают световая среда и уровень запыленности на рабочем месте. Несоблюдения соответствия уровня освещенности выполняемым работам приводит к ухудшению функционального состояния персонала. В результате происходит снижение внимания и скорости реакции, при этом усталость и стресс персонала возрастает [9-11]. В зависимости от уровня запыленности и фракционного состава пыли свет на рабочих местах будет рассеиваться, что значительно снизит видимость и условия работы [12]. При этом горнодобывающие предприятия характеризуются несоответствием скорости восстановления персонала во время регламентированного отдыха и интенсивности трудозатрат при выполнении работ [13]. Таким образом, увеличивается риск совершения ошибочных действий, что может привести к травмам.

Согласно статистическим данным, уровень травматизма в горной промышленности снижается, но остается высоким, в результате чего необходимо рассматривать новые области и направления в изучении вопросов обеспечения безопасности на горных предприятиях [14, 15]. В качестве одного из перспективных направлений рассматривается обеспечение комплексного подхода с использованием индексов безопасности. Основным фактором в оценке безопасности становится сам работник, поскольку имеет определенный набор реакций на

возникающие опасности. Таким образом, необходимо повышать надежность персонала для снижения технических отказов и предупреждения несчастных случаев [16, 17]. В этой связи заблаговременное определение склонности кандидатов к травмам позволит повысить эффективность процедуры профессионального отбора [18, 19], а учет комплексного индекса безопасности – грамотно принимать управленческие решения по мониторингу функционального состояния работников и уровня безопасности в целом [20].

**Методология.** Для организации необходимого уровня безопасности на рабочих местах персонала минерально-сырьевого комплекса следует проводить профотбор с учетом опасностей, выявленных на рассматриваемом рабочем месте, и личностных качеств, которые характеризуются склонность к небезопасной деятельности. Профессиональный отбор позволит учесть психофизиологические качества работников, определяющие их поведение при ухудшении условий труда или реализации опасных ситуаций. Для подбора методик рассматривались следующие характеристики:

– функциональные резервы дыхательной и сердечно-сосудистой системы, физическая подготовка.

– уровень нервно-психической устойчивости.

Для учета указанной совокупности индивидуальных качеств, а также комплексного анализа профессиональной пригодности, был определен набор методик оценки:

– психоэмоционального состояния;

– физиологических показателей.

Исследуемые показатели и методы определения представлены в таблице 1.

*Таблица 1 – Применяемые методики оценки психофизиологических показателей (составлено автором)*

| Вид индивидуальных показателей | Методика оценки |
|---|---|
| Психоэмоциональное состояние | анкеты самооценки состояния (АСС); |
| | дифференцированная оценка работоспособности и стресса (ДОРС); |
| | оценка скорости переработки зрительной информации по корректурной пробе. |
| Физиологические показатели | частота сердечных сокращений (ЧСС); |
| | температура тела; |
| | частота дыхания; |
| | проба на задержку дыхания Штанге; |
| | проба на задержку дыхания Генча. |

Методики оценки психоэмоционального состояния и физиологических показателей выбирались исходя из доступности и скорости проведения, поскольку подразумевают определение показателей перед началом работ и после. Также, методики могут быть дополнены или исключены в зависимости от вида выполняемых работ, тяжести и напряженности процесса.

**Результаты.** В целях проведения оценки уровня безопасности при перемещении работников по выработкам и установке датчиков и оборудования были выбраны методики:

– оценки психоэмоционального состояния: АСС и ДОРС;

– оценки динамики физиологических показателей: температура тела и ЧСС.

Выбор методик основан на том, что выполняемые работы не характеризуются высокой тяжестью и напряженностью.

Измерения физиологических показателей позволили установить цену деятельности, затрачиваемые ресурсы и скорость восстановления организма при выполнении поставленных задач. Температура поверхности тела измерялась с применением регистраторов температуры *TR-1G*. Измерения ЧСС проводились с помощью нагрудного датчика пульса фирмы *Wahoo* и приложения к нему *POLAR*. Устройства крепились на поверхность тела.

Полученные данные представлены на рисунках 1 и 2.

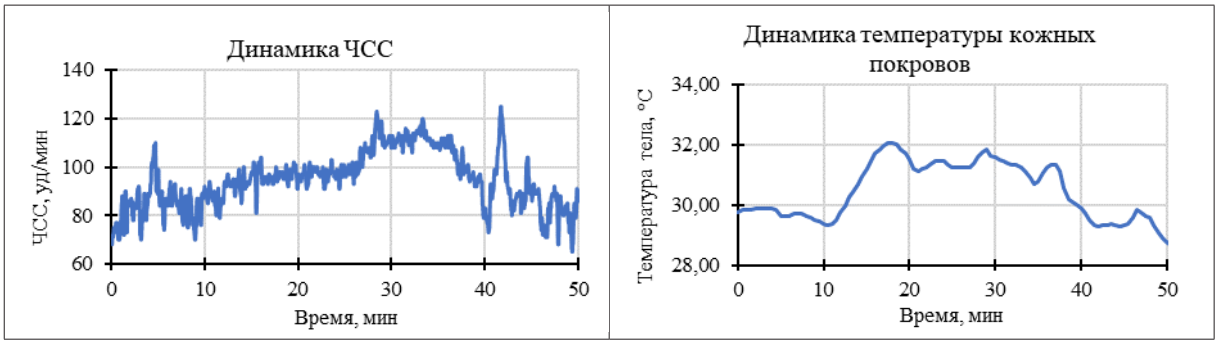



*Рисунок 1 – Динамика физиологических параметров при выполнении определенных операций в течение 50 минут (материал авторов)*

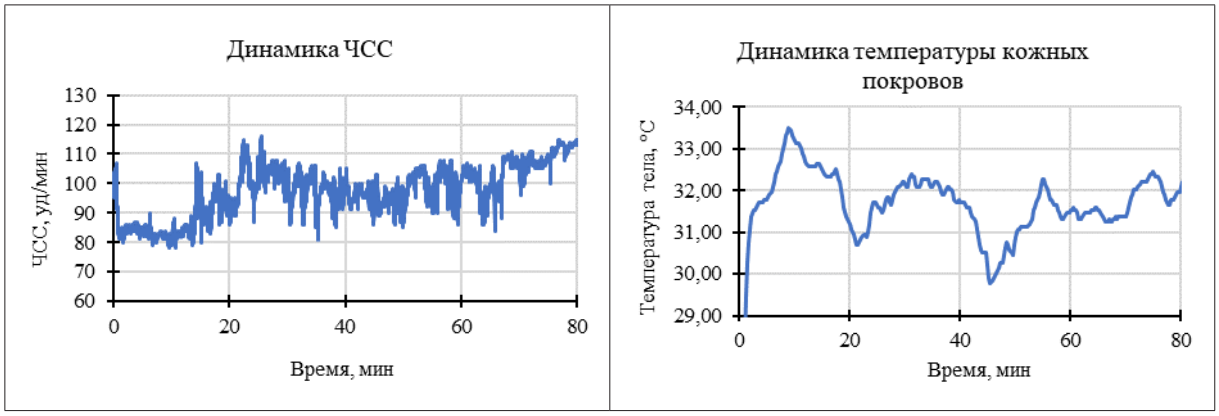



*Рисунок 2 – Динамика физиологических параметров при выполнении определенных операций в течение 80 минут (материал авторов)*

В результате была установлена скорость реакции организма на выполняемую нагрузку и скорость восстановления. На 1 рисунке видно, что при выполнении поставленных задач (установка датчиков и оборудования) в первые 10 минут интенсивность труда увеличилась, что характеризует изменение ЧСС. При этом температура поверхности тела начала изменятся только при прекращении нагрузки. Аналогично на рисунке 2, изменение ЧСС в первые несколько минут соответствует выполнению поставленной задачи. Таким образом, наиболее информативным показателем при данных видах работ является частота сердечных сокращений, поскольку характеризует и физиологические и психоэмоциональные изменения, в то время как температура поверхности тела является вторичным показателем.

Оценка психоэмоционального состояния (табл. 1) проводилась до и после выполнения работ. Прирост определяемых показателей позволяет оценить влияние выполняемой деятельности на психоэмоциональное состояние респондента, что позволяет оценить динамику и выявить нарастание психоэмоциональных признаков утомления. В результате проведения оценки было установлено ухудшение самочувствия, снижение таких параметров, как внимание, интерес к работе и бодрость. Также наблюдается развитие утомления и стресса.

При этом установлено, что испытуемые, склонные к небезопасному поведению, характеризуются сниженным уровнем нервно-психической устойчивости, а также высокими показателями ЧСС, в том числе в состоянии покоя, что особенно важно учитывать при воздействии факторов производственной среды.

**Обсуждение.** В настоящий момент психофизиологические качества работников при трудоустройстве на рабочие места с вредным воздействием не учитываются, в результате чего персонал оказывается неадаптированным при реализации опасных ситуаций [21, 22].

Исследования отечественных ученых показывают, что, как и психоэмоциональное, так и физиологическое состояние работников под воздействием сложного комплекса климатических условий [23], вредных факторов производственной среды и трудового процесса ухудшается. Факторы окружающей среды также оказывают значительное воздействие на уровень стресса работников [24, 25]. Длительное профессиональное утомление увеличивает вероятность совершения ошибочных действий и провоцирует развитие различных заболеваний. Таким образом, работоспособность и качество выполнения работ зависят от психофизиологических показателей [26]. Указанные характеристики оказывают непосредственное влияние на надежность человеческого фактора, что необходимо учитывать при проведении профессионального отбора и оценки рисков.

Применяемые на предприятиях минерально-сырьевого комплекса методики оценки профессиональных рисков необходимо адаптировать для своевременной оценки человеческого фактора, подтверждения профессиональной пригодности персонала для работ в условиях воздействия вредных производственных факторов. Рассматриваемый подход позволит комплексно оценивать влияние человеческого фактора на безопасность выполнения работ.

В целях учета индивидуальных качеств работников при расчете профессиональных рисков, рекомендуется вводить коэффициенты учета склонности персонала к травматизму и реализации опасных действий [27, 28]. Также могут быть использованы интегральные показатели для оценки уровня безопасности. При этом необходимо проводить комплексный анализ имеющихся рабочих мест с выявлением и ранжированием имеющихся опасностей. Так, для обеспечения полноты проводимой оценки в качестве влияющих факторов могут рассматриваются вредные факторы производственной среды и трудового процесса, установленные на конкретном или аналогичных рабочих местах, опасные проявления и источники опасности, характерные для технологического процесса, предприятия или горно-геологических условий.

Таким образом, динамика состояния работника позволяет определить как ухудшение условий среды, что проявляется в изменениях физиологических

показателей, так, уровень надежности человеческого фактора, который характеризуется уровнем нервно-психической регуляции и поведением работника. В результате, без повышения надежности человеческого фактора, совершенствование технических систем становится неэффективным [29, 30].

Для реализации риск-ориентированного подхода разрабатываются и совершенствуются методы оценки профессиональных рисков. В методиках учитываются различные критерии, характеризующие вероятность и тяжесть, условия, одновременность эффектов, эффективность оценки и другие [31, 32], но не учитывают подготовку и динамику состояния самих работников.

В ряде исследований проводится оценка риска с учетом особенностей источников опасности, которые позволяют выявить причины реализации крупных аварий в горнодобывающей промышленности даже с учетом имеющейся тенденции снижения общей статистики травматизма [33, 34]. Однако для реализации комплексного подхода к разработке метода оценки уровня безопасности и его динамики в различных условиях необходимо включить в методику оценку человеческого фактора и оценку «цены» деятельности персонала при выполнении работ.

Рассматриваемые показатели необходимо учитывать при проведении обучения и инструктажей и внедрять в подготовку совместно с современными технологиями [35], а также рассматривать при разработке мероприятий по снижению уровня стресса среди работников [36].

**Выводы.** Уровень безопасности на рабочих местах во многом зависит от действий самого работника и не может в полной мере обеспечиваться техническими и организационными мероприятиями. Согласно официальным статистическим данным, риск возникновения травмоопасных ситуаций на рабочих местах, на которых установлено воздействие вредных и опасных производственных факторов, значительно выше. В результате возникает необходимость разработки комплексного подхода для оценки совокупного воздействия производственных и психофизиологических факторов, что позволит включить надежность человеческого фактора в оценку безопасности на рабочих местах.

Разрабатываемые методы оценки применимы для разработки современных программ подготовки специалистов в области безопасности, проведения профессионального отбора на места с повышенной опасностью, а также для принятия управленческих решений при организации рабочих мест.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Tripti M., Kailash K., Harsha V., Mangalpady A., Raj M. Effect of Heat on Underground Mine Workers // Procedia Earth and Planetary Science. 2015. – V. 11. – P. 491-498. https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.06.049.

2. Богданчикова Т.В., Морозова Т.В. Роль условий труда в формировании уровня трудовой активности работников // Вестник СИБИТа. – 2017. – №4 (24).

3. Peiffer J.J., Abbiss Ch.R., Thermal Stress in North Western Australian Iron Ore Mining Staff // The Annals of Occupational Hygiene. 2013. – V. 57. – Issue 4. – P. 519-527, https://doi.org/10.1093/annhyg/mes084.

4. Голод, В.А., Рудаков, М.Л., Степанова, Л.В. Обеспечение теплового комфорта работников угольных шахт с учетом средств индивидуальной защиты // Горный информационно-аналитический бюлле-тень. (4-специальный выпуск 7). 2019. – С. 39-49. https://doi.org/10.25018/0236–1493–2019-4-7-39-49.

5. Li J., Qin Y., Yang L., Wang Z., Han K., Guan C. A simulation experiment study to examine the effects of noise on miners' safety behavior in underground coal mines // BMC Public Health 21. 2021. Article number: 324. https://doi.org/10.1186/s12889-021-10354-2.

6. Fu Wen, Luo Zhenmin, Wang Jianguo, Cao Chen-Rui, Shu C. M. Experimental study of the influence of coal mine noise on miners // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2022. 80(10075):104926. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2022.104926.

7. Wang Y., Huang X., Zhang J., Huang Sh., Wang J., Feng Ya., Jiang Zh., Wang H., Yin Sh. Bottom-Up and Top-Down Attention Impairment Induced by Long-Term Exposure to Noise in the Absence of Threshold Shifts // Frontiers in Neurology. 2022. (13), 836683. https://doi.org/10.3389/fneur.2022.836683.

8. Jafari M.J., Khosrowabadi R., Khodakarim S., Mohammadian F. The effect of noise exposure on cog-nitive performance and brain activity patterns // Open Access Macedonian Journal of Medical Sciences. – 2019. (7-17). 2924-2931. https://doi.org/10.3889/oamjms.2019.742.

9. Бочарова А.М. Анализ влияния плохой освещенности на безопасность труда, ее расчет и методы улучшения // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2023. – №3. – С. 310-312.

10. Дунаева Д.М., Клюшникова Е.В. Методика оценки риска патологии зрительного анализатора на основе определения качества световой среды // Здоровье – основа человеческого потенциала: проблемы и пути их решения. – 2019. – №2. – С. 567-574.

11. Jayawardena A., Duffy D., Manahan J. Lighting Matters in Industrial Environments: A Framework Linking Workplace Safety to Lighting Quality Metrics // IEEE Industry Applications Magazine. 2017. Pp. XX6-XX6. https://doi.org/10.1109/MIAS.2016.2600697.

12. Смирняков В.В., Родионов В.А., Смирнякова В.В., Орлов Ф.А. Влияние формы и размеров пылевых фракций на их распределение и накопление в горных выработках при изменении структуры воздушного потока // Записки Горного института. – 2022. – Т. 253. – С. 71-81. https://doi.org/10.31897/PMI.2022.12.

13. Сорокин Г.А., Шилов В.В. Оценка годового прироста риска нарушения здоровья работников при высокой интенсивности труда // Гигиена и санитария. 2020. – №6.

14. Чемезов Е.Н. Принципы обеспечения безопасности горных работ при добыче угля // Записки Горного института. – 2019. – Т. 240. – С. 649-653. https://doi.org/10.31897/PMI.2019.6.649.

15. Гендлер С.Г., Фалова Е.С. Использование риск-ориентированного подхода для выбора адресных мероприятий по снижению производственного травматизма // Безопасность труда в промышленности. – 2022. (9), 82-87. https://doi.org/10.24000/0409-2961-2020-9-82-87.

16. Ajith M.M., Ghosh A.K., Jansz J. Contributing effects of individual characteristics, behavioural and job-related factors on occurrence of mining-related injuries: A systematic review // Work. 2022. №71(1). – P. 87-117. https://doi.org/10.3233/WOR-205227.

17. Ghosh A.K., Bhattacherjee A., Chau N. Relationships of working conditions and individual characteristics to occupational injuries: a case-control study in coal miners // J Occup Health. – 2004. – №46(6). – P. 470-80. https://doi.org/10.1539/joh.46.470.

18. Цхадая Н.Д., Захаров Д.Ю. Совершенствование процедуры профессионального отбора персонала для работ с повышенной опасностью // Записки Горного института. – 2018. – Т. 230. – С. 204-208. https://doi.org/10.25515/PMI.2018.2.204.

19. Иванов Ю.М., Куракина Н.В. и др. Анализ травматизма работников, обусловленного трудовым стажем. Оценка рисков травматизма // Уголь. – 2022. – № 2(1151). – С. 37-40. https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-2-37-40.

20. Гендлер С.Г., Прохорова Е.А. Методические основы

выбора приоритетных направлений управления охраной труда при подземной добыче угля на основе анализа динамики интегрального риска травматизма и профессиональной заболеваемости // Горный журнал. – 2023. – № 9. – С. 41-48. https://doi.org/10.17580/gzh.2023.09.06.

21. Кабанов Е.И., Туманов М.В., Сметанин В.С., Романов К.В. Инновационный подход к профилактике травм на горнодобывающих предприятиях на основе управления человеческим фактором // Записки Горного института. – 2023. – Т. 263. – С.774-784.

22. Koteleva N., Kuznetsov V., Vasilyeva N. A Simulator for Educating the Digital Technologies Skills in Industry. Part One. Dynamic Simulation of Technological Processes // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. Iss. 22. № 10885. https://doi.org/10.3390/app112210885.

23. Пряничников С.В. Психофизиологическое состояние организма в зависимости от длительности пребывания в высоких широтах Арктики // Экология человека. 2020. – №12.

24. Качина А.А., Злоказова Т.А., Внуков И.Ю. Регуляторно-личностные факторы надёжности деятельности оперативного персонала энергетических объектов // Вестник Московского университета. Серия 14. Психология. 2021. – №2.

25. Lu Y., Zhang Z., Yan H., Rui B., Liu J. Effects of Occupational Hazards on Job Stress and Men-tal Health of Factory Workers and Miners: A Propensity Score Analysis // BioMed Research International. 2020. Vol. 2020. https://doi.org/10.1155/2020/1754897.

26. Новожилова А.А., Герегей А.М., Меркулова А.Г. Особенности исследования профессионального утомления в физиологии труда // Мед. труда и пром. экол. 2022. – №4.

27. Kang D. Workability and Life Satisfaction: Effects of Workers' Positive Perceptions on Their Return to Jobs // Safety and Health at Work. 2022. Vol. 13. Iss. 3. P. 286-293. https://doi.org/10.1016/j.shaw.2022.05.002.

28. Николаев А.Б. Прогнозирование проявления человеческого фактора и коррекция вероятности его негативного влияния // Безопасность труда в промышленности. – 2017. – № 9. – С. 52-57. https://doi.org/10.24000/0409-2961-2017-9-52-57.

29. Глебова Е.В., Волохина А.Т., Вихров А.Е. Оценка эффективности управления культурой производственной безопасности в компаниях ТЭК // Записки Горного института. – 2023. – Т. 259. – С. 68-78. https://doi.org/10.31897/PMI.2023.12.

30. Юрак В.В., Душин А.В., Мочалова Л.А. Против устойчивого развития: сценарии будущего // Записки Горного института. – 2020. – Т. 242. – С. 242-247. https://doi.org/10.31897/PMI.2020.2.242.

31. Moloudi A., Khaloo S.S., Gholamnia R., Saeedi R. Prioritizing health, safety and environmental haz-ards by integrating risk assessment and analytic hierarchy process techniques in solid waste management facilities // Taylor and Francis Ltd. 2021. Pp. 1-12. https://doi.org/10.1080/19338244.2021.1977907.

32. Овчинникова Т.И., Потоцкий Е.П., Фирсова В.М. Риск-ориентированный подход при оценке опасностей в горной промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – №2(1). – С. 199-208. https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-21-0-199-208.

33. Смирняков В.В., Каргополова А.П., Смирнякова В.В., Кабанов Е.И., Алмосова Я.В. Риск-ориентированный подход как инструмент повышения качества подготовки и развития персонала АО "СУЭК-Кузбасс" // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2022. – № 6-1. – С. 214-229. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_61_0_214.

34. Кабанов Е.И. Определение допустимого профессионального риска травмирования работников угледобывающих предприятий // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 5. – С. 167-180. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_5_0_167.

35. Кречманн Ю., Плиен М., Тхи Хоаи Нга Нгуен, Рудаков М.Л. Эффективное наращивание потенциала в горном деле за счет обучения, расширяющего возможности в области управления охраной труда // Записки Горного института. – 2020. – Т. 242. – С. 248-256. https://doi.org/10.31897/PMI.2020.2.248.

36. Lvov V.V., Smirnova Z.V., Artemova E.I. et al. State of University-Employer Interaction Models in Russia // Journal of Entrepreneurship Education. 2019. Vol. 22. Iss. 4. – P. 1-9.

*Статья поступила в редакцию 03.05.2024*
*Статья принята к публикации 17.06.2024*

УДК 332.36
EDN: UBJGSX

# ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЗЕМЕЛЬНЫХ УЧАСТКОВ НА ОСНОВЕ ИНДИКАТОРОВ С УЧЕТОМ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

© Автор(ы) 2024

SPIN: 5092-6494
AuthorID: 131728
ORCID: 0000-0002-3054-1786
ScopusID: 6508255564

**БАДЕНКО Владимир Львович**, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник
*Агрофизический научно-исследовательский институт*
*(195220, Россия, г. Санкт-Петербург, Гражданский просп., д. 14, e-mail: badenko_vl@spbstu.ru)*

SPIN: 4611-1144
AuthorID:108184
ORCID: 0000-0001-6139-8719
ScopusID: 7101634822

**ФЕДОРОВ Михаил Петрович,** доктор технических наук, президент, профессор,
профессор высшей школы гидротехнического и энергетического строительства
*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*
*(195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, m.fedorov@spbstu.ru)*

SPIN: 7576-2071
AuthorID: 36277
ORCID: 0000-0003-4817-7974
ScopusID: 6507413522

**МАСЛИКОВ Владимир Иванович,** доктор технических наук, профессор,
профессор высшей школы гидротехнического и энергетического строительства
*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*
*(195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, vmaslikov@list.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*
*(195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, asminaster7@gmail.com)*

SPIN: 6516-2037
AuthorID: 478195
ORCID: 0000-0002-9520-4094
ResearcherID: AAE-9510-2019

**ЕФРЕМОВА Сания 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)*

**Аннотация.** Современное состояние земельных участков, используемых для производства сельхозпродукции определяется под влиянием процессов, происходящих в почве, растениях и атмосфере. Эти процессы описываются данными наблюдений, сложными моделями и субъективным мнением специалистов. В работе предложен подход для геоэкологической оценки сельскохозяйственных земельных участков, на основе проблемно-ориентированных индикаторов, которые обобщают эту информацию в удобной для решения конкретных задач форме. В данной работе описаны и проанализированы три группы проблемно-ориентированных индикаторов, которые построены на базе методов теории нечетких множеств. Первая группа посвящена оценке сельскохозяйственных участков с озимыми культурами с точки зрения морозостойкости. Вторая группа показателей ориентирована на оценку эффективности почвенных обработок для поддержания требуемой кислотности почв. Вторая группа показателей ориентирована на оценку нарушенности почв вследствие уплотнения. Для иллюстрации методологии представлены вычисления, результаты которых интегрированы в географическую информационную систему, что позволяет наглядно отобразить пространственное распределение геоэкологических индикаторов в виде тематических карт.

**Ключевые слова:** проблемно-ориентированные индикаторы, нарушение почв, повреждение озимых культур, нечеткие множества, нечеткие и четкие индикаторы, геоинформационные технологии.

# GEOENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF LAND PLOTS BASED ON INDICATORS CONSIDERING THE UNCERTAINTY OF INITIAL DATA

© The Author(s) 2024

**BADENKO Vladimir Lvovich**, doctor of technical sciences, associate professor, chief researcher
*Agrophysical Research Institute*
*(195220, Russia, St. Petersburg, Grazhdanskiy pr., 14, e-mail: badenko_vl@spbstu.ru)*
**FEDOROV Mikhail Petrovich,** doctor of technical sciences, president, professor,
professor at the Graduate School of Hydraulic and Power Engineering
*Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University*
*(195251, Russia, St. Petersburg, st. Polytechnicheskaya, 29, e-mail: m.fedorov@spbstu.ru)*
**MASLYKOV Vladimir Ivanovich,** doctor of technical sciences, professor,
professor at the Graduate School of Hydraulic and Power Engineering
*Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University*
*(195251, Russia, St. Petersburg, st. Polytechnicheskaya, 29, e-mail: vmaslikov@list.ru)*
**MOLODKINA Lyudmila Mikhailovna,** doctor of technical sciences, professor,
professor at the Graduate School of Hydraulic and Power Engineering
*Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University*
*(195251, Russia, St. Petersburg, st. Polytechnicheskaya, 29, e-mail: asminaster7@gmail.com)*
**EFREMOVA Saniya Yunusovna**, professor, doctor of biological sciences,
professor of the Department of Biotechnology and Technosphere Safety
*Penza State Technological University*
*(440039, Russia, г. Penza, Baidukova proezd / st. Gagarina, 1a/11 e-mail: s_sharkova@mail.ru)*

**Abstract.** The current condition of land plots used for agricultural production is determined by processes occurring in soil, plants, and the atmosphere. These processes are described by observation data, complex models, and the subjective opinions of specialists. An approach for the geo-ecological assessment of agricultural land plots, based on problem-oriented indicators that summarize this information in a form convenient for solving specific problems are proposed. Three groups of problem-oriented indicators, which are built on the basis of methods of fuzzy set theory are described and analyzed. The first group is devoted to the assessment of agricultural plots with winter crops from the point of view of frost resistance. The second group of indicators is focused on assessing the effectiveness of soil treatments to maintain the required soil acidity. The second group of indicators is focused on assessing soil disturbance due to compaction. To illustrate the methodology, calculations are presented, the results of which are integrated into a geographic information system, which makes it possible to visually display the spatial distribution of geo-ecological indicators in the form of thematic maps.

**Keywords:** problem-oriented indicators, soil disturbance, damage to winter crops, fuzzy sets, fuzzy and crisp indicators, geoinformation technologies.

***Для цитирования:*** *Баденко В.Л. Геоэкологическая оценка земельных участков на основе индикаторов с учетом неопределённости исходных данных / В.Л. Баденко, М.П. Федоров, В.И. Масликов, Л.М. Молодкина, С.Ю. Ефремова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 2(66). – С. 210-219. – EDN: UBJGSX.*

**Введение.** Геоэкологическая оценка сельскохозяйственных земельных участков на основе индикаторов с учетом неопределённости исходных данных является актуальной задачей. В общем смысле индикаторы строятся на основе атрибутов участков, которые могут быть использованы для количественной оценки состояния конкретного ландшафта или экосистемы. Они могут быть выведены из биофизических, экономических, социальных, управленческих и институциональных атрибутов, а также из целого ряда натурных измерений [1-3]. При этом традиционно в качестве индикаторов использовались результаты физико-статистического анализа сельскохозяйственных полей.

В общем случае следует отметить, что во многих случаях для решения геоэкологических задачи разрабатываются специфические для конкретного случая индикаторы. Например, в последнее время разработано несколько индикаторов для решения различных вопросов и проблем, связанных с оценкой земель [4, 5], для управления точным земледелием [6, 7], для оценки пространственного распределения урожайности [8, 9], оценки пригодности сельскохозяйственных земель [10, 11], оценки качества почв [12, 13], оценки ресурсов сельскохозяйственных земель [14, 15], зонирования сельскохозяйственных земель [16, 17]. При этом для учета неопределенности, которую часто нельзя выразить с помощью вероятностных методов, перспективным является использование подходов на основе теории нечетких множеств [4, 7]. Индикаторы, которые используются для геоэкологических оценок в вышеперечисленных задачах будем назвать проблемно-ориентированными. Такие проблемно-ориентированные индика-

торы все чаще используются для диагностики текущего состояния земель сельскохозяйственного назначения и совершенствования процесса информационной поддержки принятия решений. По нашему мнению, индикаторы являются ценным инструментом для информационной поддержки принятия решений, поскольку они синтезируют доступную информацию и могут помочь в понимании прогнозного поведения сложных систем в рамках модельно-ориентированной системной инженерии [18]. При этом проблемно-ориентированные индикаторы являются ядром проблемно-ориентированного подхода [8, 19]. При таком подходе текущее состояние сельскохозяйственных угодий определяется на основе конкретных условий процессов в почве, растениях и атмосферы с помощью адекватных процесс-ориентированных моделей. Таким образом, конкретные условия описываются на основе разнообразных данных наблюдений, сложных моделей, а также субъективными мнениями экспертов. Индикаторы, ориентированные на предотвращение и анализ неблагоприятных геоэкологических ситуаций, обобщают эту информацию и преобразуют в понятную практикам форму, которая может быть использована для принятия решений по конкретным проблемам.

В настоящей работе представлены практические подходы для построения геоэкологических индикаторов в условиях неопределенностью в терминах нечетких множеств. Это подходы уже доказали свою работоспособность [4, 7, 20, 21]. Вместо вероятности, теория нечетких множеств использует концепцию возможности, которая описывается в терминах функции принадлежности [7]. Функция принадлежности для нечеткого множества допускает для конкретного элемента быть частичным членом различных, частично перекрывающихся множеств. При этом вид функции принадлежности может быть определен экзогенно, с использованием мнения экспертов или на основе существующих данных.

Целью данной работы является рассмотрение трех групп геоэкологических индикаторов на основе теории нечетких множеств, которые будут полезны при оценке земельных участков, в первую очередь сельскохозяйственного назначения. Первая группа ориентирована на оценку сельскохозяйственных угодий с озимыми культурами. Хорошо известно, что повреждение озимых культур связано, в том числе, с тремя факторами: а) влиянием неблагоприятных агрометеорологических условий, б) температурой почвы в корневой зоне и в) реакцией озимых культур на негативные условия окружающей среды. Взаимодействие этих факторов очень сложное и использование индикаторов, описывающих повреждение озимых культур, полезно для поддержки принятия управленческих решений на сельскохозяйственных угодьях в зимний период. Вторая группа показателей, которые необходимо учитывать, – это показатели, используемые для оценки эффективности внесения химикатов в почву. Доказано, что разнообразные способы обработки почв, включая удобрение, известкование и т.д., полезны для улучшения состояния почвы, но часто бывает трудно принять управленческие решения относительно их полезности. В России в целом многие сельскохозяйственные земли имеют тенденцию к закислению. Однако большинство культур предпочитают почти нейтральные почвенные условия. Традиционно известь добавляется для того, чтобы достичь требуемой кислотности почвы. Но осадки в этих регионах идут постоянно, и через несколько лет почвы снова закисляются. Поэтому оценка влияния известкования на структуру и прочность грунта с помощью индикатора представляет практический интерес. Третья группа индикаторов, которые будут рассмотрены, – это индикаторы, используемые для оценки нарушенности почвы. Оценка нарушенности почв очень важна для принятия решений по управлению землепользованием в общем [20] и сельским хозяйством в частности. В данной работе описаны эти три группы проблемно-ориентированных индикаторов. Для иллюстрации методологии были проведены соответствующие вычисления, результаты которых интегрированы в географическую информационную систему (ГИС).

**Методология.** *Оценка повреждения озимых культур.* Оценка повреждения озимых культур от морозов является важнейшим аспектом мониторинга сельскохозяйственных полей. Оценки морозного повреждения озимых культур обсуждались во многих публикациях [23-25] и определяются тремя основными факторами: а) влиянием неблагоприятных агрометеорологических условий, б) температурой почвы в корневой зоне и в) реакцией озимых культур на неблагоприятные агрометеорологические условия. При этом можно выделить два процесса, характеризующие этот период – промерзание и оттаивание почвы. Температура почвы в области корней зависит от того на какой глубине находится граница между мерзлым и талым слоями почвы, а также толщины снежного покрова. Модель температуры почвы в корневой зоне разработана в рамках общей теории теплообмена в почве [25].

Известно [23, 26], что устойчивость озимых культур к морозам зависит от сорта культуры, а густота посадки (количество стеблей) определяет величину термических повреждений, полученных озимой культурой. Кроме того, повреждение морозом связано со стадией роста культуры. Например, если в конце осени развитие озимых культур идет нормально, устойчивость к морозам будет сильной. Если озимая культура недоразвита или перерастает, то устойчивость к морозам будет снижена. Базовые постулаты для разработки индикатора морозного повреждения (*IDF*) сформулируем следующим образом:

1. *IDF* определяется как число в диапазоне от 0 до 1 и моделируется соответствующей нечеткой функ-

цией принадлежности [4, 7, 27].

2. Выбор функции принадлежности является в некоторой степени произвольным и должен отражать экспертное мнение.

Критические температуры ($T_{root}$) можно определить как температуру почвы на глубине 2 см, при которой озимые культуры будут повреждены. Индикатор морозного повреждения (*IDF*) предлагается описывать согласно соотношению (1). В (1) параметры $n_1$ и $n_2$ определены таблицей 1, где указаны различные значения параметров в зависимости от озимой культуры и состояния посевов в начале зимы. При этом $0 < f(T_{root}) < 1$ – отражает мнение эксперта на морозостойкость конкретной культуры и является линейной функцией, которая меняется от 0 до 1 на отрезке от $n_1$ до $n_2$.

$$IDF = \begin{cases} 0, T_{root} > n_1 \\ f(T_{root}), n_2 \le T_{root} \le n_1 \\ 1, T_{root} < n_2 \end{cases} \quad (1)$$

Можно видеть, что если *IFD* равен 1, то имеет место максимальное воздействие мороза. Если *IDF* равен 0, то ущерб озимым культурам незначителен.

*Таблица 1 – Значения параметров n1 и n2*

| Озимых | $n_1$, °C | $n_2$, °C |
|---|---|---|
| Ячмень:<br>• Недоразвитая культура (underdeveloped)<br>• Нормальное состояние (normal)<br>• Переросшее состояние (outgrowing) | <br>-7<br>-14<br>-7 | <br>-12<br>-19<br>-13 |
| Рожь:<br>• Недоразвитая культура (underdeveloped)<br>• Нормальное состояние (normal)<br>• Переросшее состояние (outgrowing) | <br>-11<br>-14<br>-11 | <br>-22<br>-25<br>-22 |
| Пшеница со средней морозостойкостью:<br>• Недоразвитая культура (underdeveloped)<br>• Нормальное состояние (normal)<br>• Переросшее состояние (outgrowing) | <br>-11<br>-14<br>-10 | <br>-17<br>-19<br>-15 |

*Оценка почвенных обработок.* Доказано, что почвенные химические обработки полезны для улучшения состояния почвы, но часто бывает трудно принять управленческие решения относительно их полезности. Эффективность почвенных обработок в рамках оценок, основанных на модели нечетких индикаторов [4, 7, 27], можно оценить по двум показателям: Простой показатель влияния (*IFS*) и Комплексный показатель влияния (*IFC*). С помощью *IFS* можно определить эффективность почвенных обработок, когда рассматривается только один параметр почвы. С помощью *IFC* можно рассчитать оценку эффективности внесения различный веществ в почву на основе информации о нескольких параметрах почвы.

*IFS* определяется следующим образом:

$$IDF = \frac{P_{max} - P}{P_{max} - P_{min}}, \; P_{min} \le P \le P_{max}, \quad (2)$$

где $P$ – рассматриваемый параметр почвы (текущее значение), $P_{min}$ – минимальное значение рассматриваемой поправки почвы, $P_{max}$ – максимальное значение рассматриваемого параметра почвы.

Как уже указывалось, закисление является естественным процессом для регионов с влажными климатическими условиями, где количество осадков превышает испарение. Однако большинство культур предпочитают почти нейтральные почвенные условия [28]. Традиционно известь добавляется для того, чтобы улучшить параметр кислотности почвы. Но в этих регионах непрерывные осадки приводят к возвращению кислых почвенных условий – через несколько лет за счет вымывания влияние известкования уменьшится.

Для лучшего понимания в сельском хозяйстве непосредственный интерес представляет влияние добавок соединений кальция, таких как известь и гипс, в том числе и на прочность и структуру почвы. Прочность на растяжение является особенно полезной мерой прочности грунта, поскольку она чувствительна к микроструктурному состоянию почвы [29]. Цель данного примера состоит в том, чтобы проиллюстрировать применение *IFS* для оценки влияния добавок соединений кальция на структуру и прочность грунта.

В качестве отправной точки используются известные модели [30-31]. Уравнения линейной регрессии, описывающие эти соотношения, следующие:

$$S = n_1 + n_2 Ca^{2+} + n_3 w, \quad (3)$$

$$R = m_1 + m_2 Ca^{2+} + m_3 w, \quad (4)$$

где $S$ – предел прочности (кПа), $R$ – шероховатость поверхности разрушения комьев грунта (мм), $n_i$ и $m_i$, $i = 1, 2, 3$ – эмпирические коэффициенты (табл. 2), $Ca^{2+}$ – количество внесенного кальция (кг·кг$^{-1}$), $w$ – содержание воды в почве (кг·кг$^{-1}$). Эти уравнения получены в диапазоне 0- 4*10$^{-3}$ кг·кг$^{-1}$ для $Ca^{2+}$ и 0.1 – 0.22 кг·кг$^{-1}$ для $w$.

Модель описывает ситуации, когда обработка почвы не проводится (например, на многолетних пастбищах) и в условиях естественных осадков. Кроме того, приведенные выше уравнения линейной регрессии учитывают остаточные эффекты влияния добавок соединений кальция на структурно деградированную почву через 6-7 лет после внесения. Учитывая, что диапазон для $Ca^{2+}$ составляет 0-4*10$^{-3}$ кг·кг$^{-1}$, рассчитаем прогнозируемое значений предела прочности при растяжении $S$ и соответствующего *IFS* (табл. 3).

*Таблица 2 – Эмпирические коэффициенты $n_i$ и $m_i$, в уравнениях (3) и (4)*

| В формуле (3) на прочность при растяжении | | В формуле (4) для определения шероховатости поверхности трещины грунтовых комьев | |
|---|---|---|---|
| $n_1$ | 9.5 | $m_1$ | 0.21 |
| $n_2$ | -324 | $m_2$ | -8.4 |
| $n_3$ | -18 | $m_3$ | 0.26 |

*Таблица 3 – Значения предела прочности при растяжении (S) и IFS*

| Количество кальция, кг кг$^{-1}$ | *S*, кПа | IFS по формуле (2) |
|---|---|---|
| 0 | 6.8 | 0 |
| 0.001 | 6.476 | 0.249231 |
| 0.002 | 6.152 | 0.498462 |
| 0.004 | 5.504 | 1 |

*Оценка нарушений почвы.* Нарушение почв является большой проблемой, и оценка нарушения почвы очень важна для принятия решений по управлению сельским хозяйством и экологией [33-35]. Небольшие уровни нарушения почвы могут привести к эрозии поверхности почвы и движению почвенной массы. Обычно это приводит к потере органического вещества и снижению плодородия почвы. Предлагается использовать два индикатора: «Простой показатель нарушения почвы» (*DFS*) и «Комплекс показатель нарушения почвы» (*DFC*). *DFS* определяется как число в диапазоне от 0 до 1 и моделируется соответствующей функцией принадлежности [4, 7, 27]. Он отражает измеренные параметры почвы, на которые влияет нарушение почвы. Будем моделировать *DFS* возрастающей кусочно-линейной функцией принадлежности, которая представлена следующим образом:

$$IDF = \begin{cases} 0, \text{если } Y = 0 \\ Y, \text{если } 0 < Y < 1 \\ 1, \text{если } Y = 1 \end{cases}, \quad (5)$$

$$y = \frac{P_n - P_d}{P_{max} - P_{min}}, Y = |y|, \quad (6)$$

$$P_{max} = max\,(P_{max,n}, P_{max,d}), \quad (7)$$

$$P_{min} = min\,(P_{min,n}, P_{min,d}), \quad (8)$$

где $P$ – параметр почвы, $P_n$ – параметр почвы на участке в естественных условиях (без нарушений) ($P_{min,\,n} \le P_n \le P_{max,\,n}$), $P_d$ – параметр почвы на участке с нарушением ($P_{min,\,d} \le P_d \le P_{max,\,d}$), $P_{min}$ – минимальное значение параметра, $P_{max}$ – максимальное значение, а $Y$ — абсолютная величина (модуль) $y$. При этом значение индикатора равное 0 означает отсутствие нарушения, а равное 1 – необходимость срочных мер по борьбе с нарушением почвы.

*DFC* вычисляется путем объединения отдельных компонентов *DFS* с использованием алгоритмов нечеткой агрегации [4, 7, 27]. С помощью *DFC* можно оценить комбинированный эффект нескольких *DFS* для повышения чувствительности измерения потенциальных воздействий нарушения почвы.

**Результаты.** *Оценка повреждения озимых культур.* В представленном ниже примере рассмотрена сельскохозяйственные поля, расположенную недалеко от Санкт-Петербурга. Пространственное распределение озимых культур в начале зимы показано на рисунке 1.

В этом примере, чтобы проиллюстрировать этот подход, *IFD* моделируется возрастающей кусочно-линейной функцией принадлежности $f(T_{root})$. Результаты вычислений приведены в рисунках 2-3 для двух вариантов ($T_{root}$ = -15°C и $T_{root}$ = -20°C).

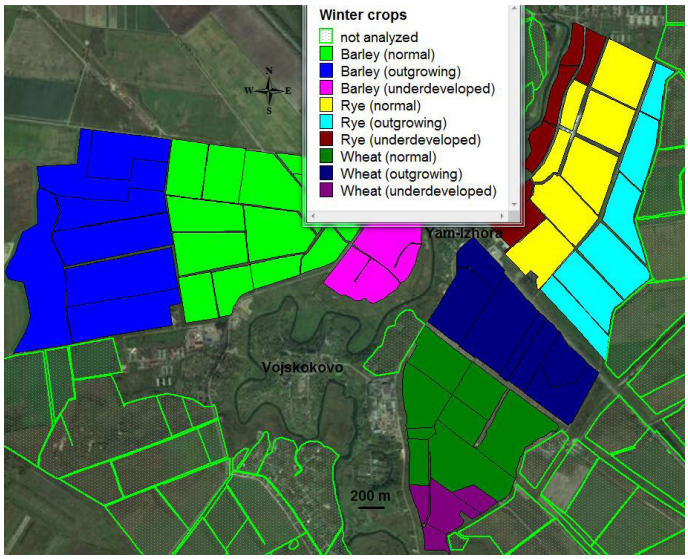



*Рисунок 1 – Пространственное распределение озимых культур и их состояние в начале зимнего периода*

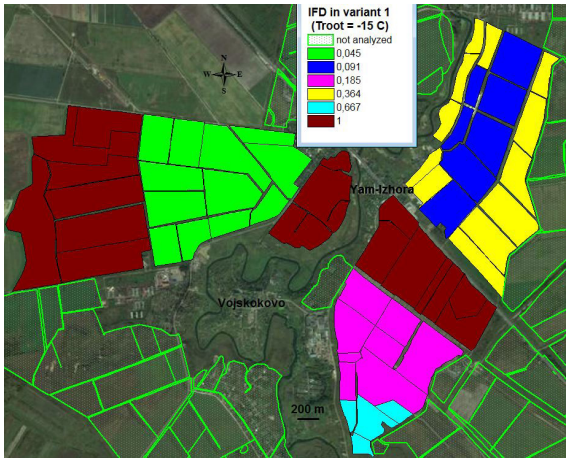



*Рисунок 2 – IFD для варианта 1 ($T_{root}$ = -15°C)*

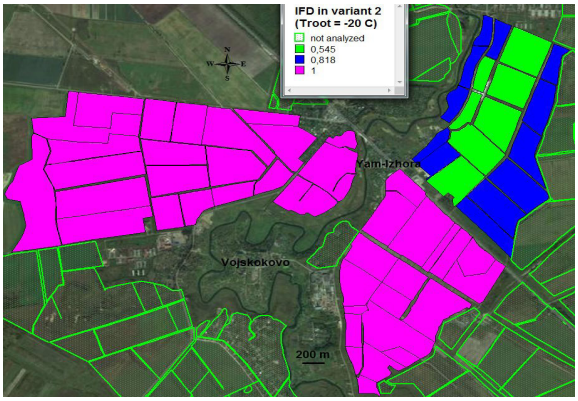



*Рисунок 3 – IFD для варианта 2 ($T_{root}$ = -20°C)*

*Оценка почвенных обработок.* В качестве демонстрационного примера использовались сельскохозяйственные участки, расположенные недалеко от Санкт-Петербурга, как и в предыдущем примере. Предполагалось, что количество внесения соединений кальция распределено так, как показано в таблице 3. Распределение количеств кальция и *S* показано на рисунках 4 и 5. Пространственное распределение соответствующего *IFS* приведено на рисунке 6.

*Оценка нарушений почвы.* На сельскохозяйственной территории, расположенной недалеко от Санкт-Петербурга, которую мы использовали в примере 1, есть несколько полей, где в настоящее время наблюдается процесс нарушения почвы. Для территориального планирования необходимо оценить уровень нарушенности почвы по сравнению с текущим состоянием почв на соседних полях.

В данном примере взвешенные коэффициенты значимости параметра почвы рассматривались как равнозначные. Результаты расчета *DFS* и *DFC* в верхнем слое почвы приведены на рисунках 7-9. Здесь анализировались только поля с нарушениями почвы.

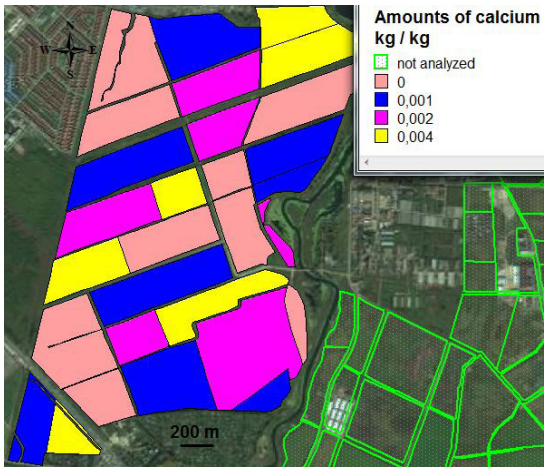



*Рисунок 4 – Количество вносимых на поля соединений кальция*

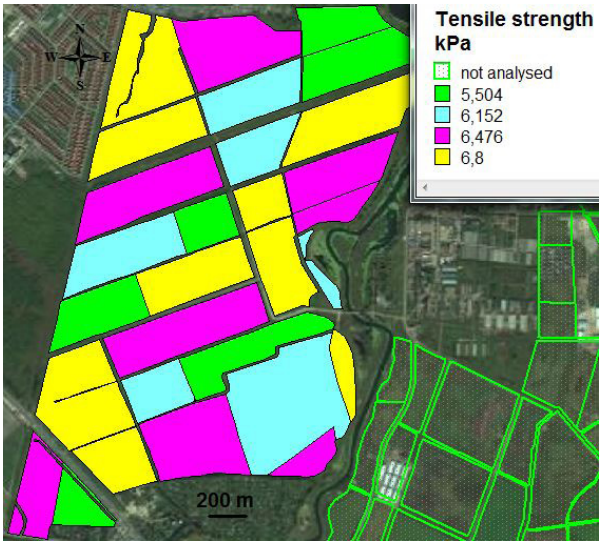



*Рисунок 5 – Значения предела прочности при растяжении после внесения соединений кальция*

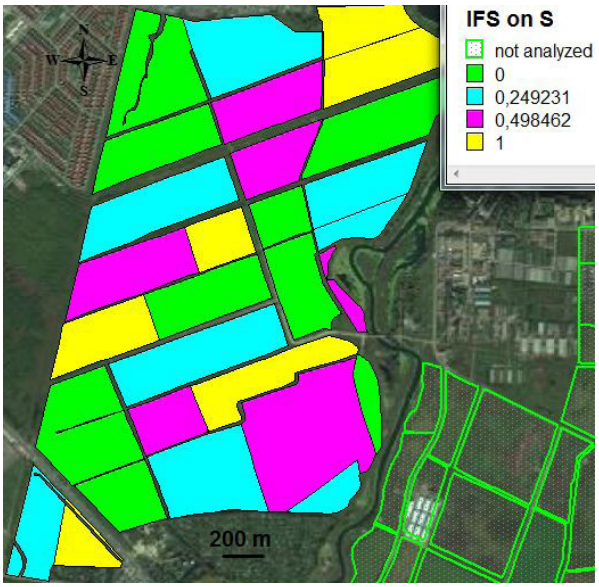



*Рисунок 6 – Пространственное распределение, соответствующего рисунку 5 IFS*

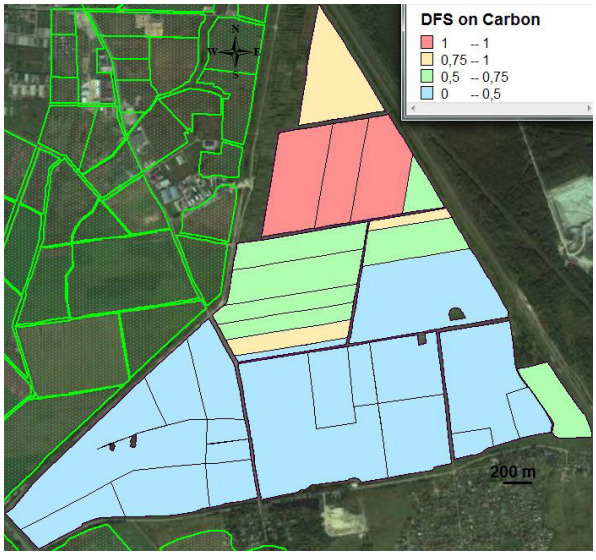



*Рисунок 7 – Оценка потерь органического вещества на основе индикатора DFS*

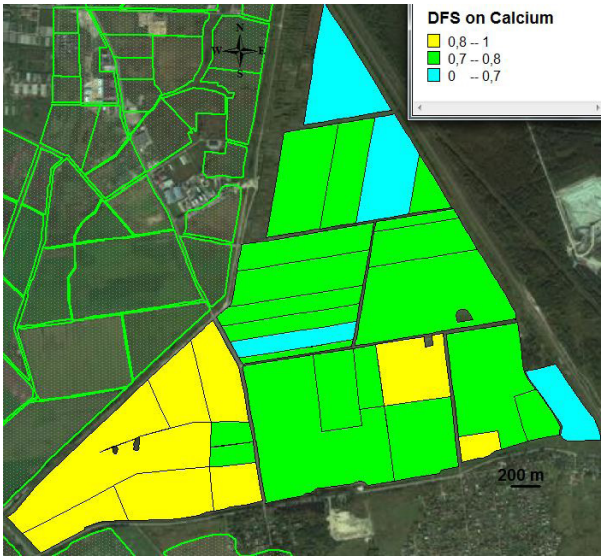



*Рисунок 8 – Оценка недостатка кальция на основе индикатора DFS*

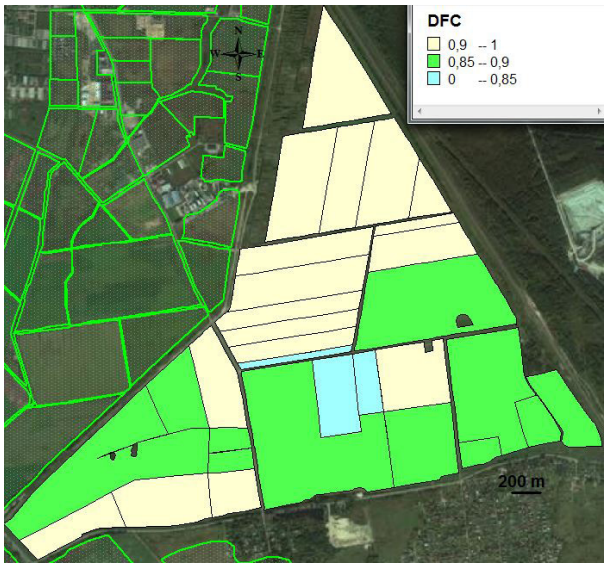



*Рисунок 9 – Комплексная оценка на основе индикатора DFC*

**Обсуждение.** Текущее состояние сельскохозяйственных угодий, которое формировалось под влиянием почвенных процессов, растений и атмосферы, описывалось сложными моделями и субъективными экспертными заключениями по данными наблюдений. Индикаторы, ориентированные на оценку геоэкологического состояния земельных участков сельскохозяйственного назначения, обобщают эту информацию в удобной форме для использования при принятии решений по конкретным проблемам.

В данной работе описаны три группы проблемно-ориентированных индикаторов. Первая группа была посвящена оценке сельскохозяйственных угодий, на которых выращиваются озимые культуры. Вторая группа показателей оценивала эффективность химической обработки почв. Третья группа индикаторов оценивает нарушенность почвенного покрова. Для иллюстрации методологии были произведены соответствующие вычисления на основе методов теории нечетких множеств и результаты интегрированы в ГИС и представлены в виде тематических карт.

На наш взгляд представленный подход позволяет наглядно представить геоэкологическое состояние сельскохозяйственных участков в таком виде, чтобы он был понятен специалистам разной квалификации и профессий.

**Выводы**. В целом геоэкологические процессы на сельскохозяйственных полях носят достаточно сложный и трудно формализуемый характер, что является причиной отсутствия адекватных процесс-ориентированных моделей и как следствие получили широкое распространение регрессионные модели [8]. В этой связи модели теории нечеткой логики являются достаточно привлекательными для информационной поддержи принятия решений на основе построения адекватных геоэкологических оценок, отражающих мнения экспертов, основанных на данных полевых исследований. Данная работа демонстрирует практические доказательства этого

тезиса. Теория нечетких множеств в отличие от теории вероятности не требует использования строго формализованного подхода, связанного, например, с определением сигма-алгебры. Нечеткие множества лучше подходя для отражения субъективного мнения экспертов.

В качестве направления дальнейших исследований рассматривается разработка методов построения более сложных оценок, которые бы отражали все типы критериев: технологических, экологических, экономических и социальных.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Andrade E.P., Bonmati A., Esteller L.J., Brunn S., Jensen L.S., Meers E., Anton, A. Selection and application of agri-environmental indicators to assess potential technologies for nutrient recovery in agriculture //Ecological Indicators. – 2022. – Т. 134. – С. 108471. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.108471.

2. Bergez J.E. et al. Integrating agri-environmental indicators, ecosystem services assessment, life cycle assessment and yield gap analysis to assess the environmental sustainability of agriculture //Ecological Indicators. – 2022. – Т. 141. – С. 109107. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.109107.

3. Арефьев Н.В., Баденко В.Л., Латышев Н.К. Геоэкологические подходы к разработке информационно-аналитических систем для гидромелиоративного строительства и природообустройства // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2010. – №. 4. – С. 205-210.

4. Arefiev N., Terleev V., Badenko V. GIS-based fuzzy method for urban planning //Procedia Engineering. – 2015. – Т. 117. – С. 39-44. – DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.121.

5. Забелина И.А., Делюга А.В. Геоэкологические индикаторы устойчивого развития: пространственный анализ //Устойчивое развитие горных территорий. – 2019. – Т. 11. – №. 1. – С. 15-25.

6. Баденко В.Л., Латышев Н.К., Слинчук С.Г. Особенности геоинформационного обеспечения технологий точного земледелия //Информация и космос. – 2009. – №. 4. – С. 53-58.

7. Баденко В.Л. Анализ экологических рисков в ГИС на основе нечетких множеств // Информация и космос. – 2013. – №3. – С. 78-84.

8. Баденко В.Л., Гарманов В.В., Иванов Д.А., Савченко А.Н., Топаж А.Г. Перспективы использования динамических моделей агроэкосистем в задачах средне- и долгосрочного планирования сельскохозяйственного производства и землеустройства // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2015. – №. 1-2. – С. 72-76.

9. Баденко В.Л., Топаж А.Г., Медведев С.А., Захарова Е.Т., Дунаева Е.А. Оценка продуктивности агроландшафтов в региональном масштабе на основе интеграции имитационной модели агроэкосистемы и ГИС // Таврический вестник аграрной науки. – 2019. – № 3 (19). – С. 18-30.

10. Ferraro D.O., Gagliostro M. Trade-off assessments between environmental and economic indicators in cropping systems of Pampa region (Argentina) //Ecological indicators. – 2017. – Т. 83. – С. 328-337. – DOI: 10.1016/j.ecolind.2017.08.020

11. Дабахова Е.В., Дабахов М.В., Самоделкин Н.С. Методические подходы к оценке земель при определении их пригодности под различные виды сельскохозяйственных угодий // Вестник Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии. – 2016. – №. 2. – С. 4-12.

12. Яковлев А.С., Гендугов В.М., Глазунов Г.П., Евдокимова М.В., Шулакова Е.А. Методика экологической оценки состояния почвы и нормирования ее качества // Почвоведение. – 2009. – №. 8. – С. 984-995.

13. Парахневич Т.М., Кирик А.И. Сравнительная оценка качества почв на ландшафтной основе //Вестник сельского развития и социальной политики. – 2016. – №. 1 (9). – С. 136-139.

14. Сапожников П.М., Ковалёв Д.В., Носов С.И. Государственный информационный ресурс для целей оценки, земельного контроля и мониторинга земель сельскохозяйственного назначения // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. – 2011. – №. 9. – С. 53-59.

15. Гарманов В.В., Богданов В.Л., Рябов Ю.В., Баденко В.Л., Загорский М.Ю. Оценка эколого-экономического ущерба от нарушения земель // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. – 2015. – №. 4. – С. 136-144.

16. Дедкова Т.А. Правовые последствия принятия законопроекта о зонировании территорий для земель сельскохозяйственного назначения // Вестник Томского государственного университета. Право. – 2019. – №. 31. – С. 142-153.

17. Арефьев Н.В., Баденко В.Л., Криулин К.Н., Осипов Г.К., Черняк М.Б. Мониторинг мелиорируемых земель на основе геоинформационных технологий //Мелиорация и водное хозяйство. – 1998. – №. 5. – С. 41-43.

18. Bolshakov N., Badenko V., Yadykin V., Tishchenko E., Rakova X., Mohireva A., Kamsky V. Barykin S. Cross-Industry Principles for Digital Representations of Complex Technical Systems in the Context of the MBSE Approach: A Review //Applied Sciences. – 2023. – Т. 13. – №. 10. – С. 6225. – DOI: 10.3390/app13106225

19. Белоедова А.В., Кожемякин Е.А. Мультимодальная коммуникация в фокусе исследовательской рефлексии: проблемно-ориентированный подход // Критика и семиотика. – 2022. – №. 2. – С. 54-70.

20. Liu C., Li W., Xu J., Zhou H., Li C., Wang W. Global trends and characteristics of ecological security research in the early 21st century: A literature review and bibliometric analysis // Ecological Indicators. – 2022. – Т. 137. – С. 108734. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.108734

21. Шатырко Д.В., Токарев К.Е., Кузьмин В.А. Моделирование экономического развития регионального АПК с использованием инструментальных сред нечеткого логического вывода // Фундаментальные исследования. – 2015. – №. 7-1. – С. 217-221.

22. Гарманов В.В., Богданов В.Л., Рябов Ю.В., Баденко В.Л., Загорский М.Ю. Оценка эколого-экономического ущерба от нарушения земель // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. – 2015. – №. 4. – С. 136-144.

23. Моисейчик В.А. Агрометеорологические условия и перезимовка озимых культур. – Л: Гидрометеоиздат, 1975. – 296 с.

24. Вильфанд Р.М., Страшная А., Береза О.В. О динамике агроклиматических показателей условий сева, зимовки и формирования урожая основных зерновых культур // Труды гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. – 2016. – № 360. – С. 45-78.

25. Куртенер Д.А., Чудновский А.Ф. Агрометеорологические основы тепловой мелиорации почв. – Л: Гидрометеоиздат, – 1979. – 231 с.

26. Размахнин Е.П. и др. Получение высокоморозостойких форм пшенично-пырейных гибридов //Вавиловский журнал генетики и селекции. – 2014. – Т. 16. – №. 1. – С. 240-249.

27. Badenko V., Kurtener D., Yakushev V., Torbert A., Badenko G. Evaluation of current state of agricultural land using problem-oriented fuzzy indicators in GIS environment // Lecture Notes in Computer Science. – 2016. – Т. 9788. – С. 57-69. DOI: 10.1007/978-3-319-42111-7_6

28. Иванов Д.А., Рублюк М.В., Анциферова О.Н. Особенности динамики закисления почв в агроландшафте // Вестник российской сельскохозяйственной науки. – 2023. – №. 5. – С. 71-77.

29. Алдошин Н.В., Васильев А.С., Голубев В.В. Исследование пределов прочности почвы на сжатие и растяжение // Агроинженерия. – 2020. – №. 3 (97). – С. 27-33.

30. Getahun G.T. Etana A., Munkholm L.J., Kirchmann H. Liming with CaCO3 or CaO affects aggregate stability and dissolved reactive phosphorus in a heavy clay subsoil // Soil and Tillage Research. – 2021. – Т. 214. – С. 105162. DOI: 10.1016/j.still.2021.105162

31. Grant C.D., Dexter A.R., Oades J.M. Residual effects of additions of calcium compounds on soil structure and strength // Soil and Tillage Research. – 1992. – Т. 22. – №. 3-4. – С. 283-297. DOI: 10.1016/0167-1987(92)90044-C.

32. Keller T., Arvidsson J., Dexter A.R. Soil structures produced by tillage as affected by soil water content and the physical quality of soil //Soil and Tillage Research. – 2007. – Т. 92. – №. 1-2. – С. 45-52. DOI: 10.1016/j.still.2006.01.001

33. Фалак А., Межова Л.А. Экологический анализ проб-

лем сельскохозяйственного природопользования Центрального Черноземья // Самарский научный вестник. – 2020. – Т. 9. – №. 2 (31). – С. 10-14.

34. Титова В.И., Шахов С.С. Изменение уреазной активности разных типов почв при их механическом нарушении // Экологический вестник Северного кавказа. – 2015. – Т. 11. – №. 3. – С. 4-9.

35. Ларионов Г.А. Бушуева О.Г., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Литвин Л.Ф., Краснов С.Ф. Оценка вклада сил негидравлической природы в нарушение связей между почвенными частицами в процессе водной эрозии // Почвоведение. – 2016. – №. 5. – С. 593-598.

*Статья поступила в редакцию 08.04.2024*
*Статья принята к публикации 17.06.2024*

УДК 69.331.438
EDN: PNAMTQ

# ОБ ОБРУШЕНИИ ДЕРЕВЯННЫХ ОПОР ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ И СВЯЗИ В ЭКСПЛУАТАЦИОННОМ ПЕРИОДЕ

© Автор(ы) 2024

SPIN: 9801-3490
AuthorID: 704170
ORCID: 0000-0002-7423-4892
ResearcherID: P-5020-2015
ScopusID: 6507592108

**КАВЕРЗНЕВА Татьяна Тимофеевна,** кандидат технических наук, доцент,
доцент Высшей школы техносферной безопасности ИСИ
*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*
*(195251, Россия, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д.29, e-mail: kaverztt@mail.ru)*

SPIN-код: 1353-8309
AuthorID: 970943
ORCID: 0000-0001-6319-5413
Scopus ID: 57210910552

**СКРИПНИК Игорь Леонидович,** кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры Пожарной безопасности технологических процессов и производств
*Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России*
*(196105, Россия, г. Санкт-Петербург, Московский проспект, д. 149, e-mail: ig.skripnick2011@yandex.ru)*

SPIN: 2462-6195
ORCID: 0000-0002-7502-386X
ResearcherID: Г-5723-2018
Scopus ID: 57215931961

**СЕНЧЕНКО Владимир Александрович**, главный специалист по охране труда
*ПАО «Ростелеком» Волгоградский филиал*
*(400048, Россия, г. Волгоград, ул. Землячки, 18, e-mail: vladimir.senchenko1973@gmail.com)*

SPIN-код: 8949-8906
AuthorID: 641418
Scopus ID: 7006063574

**НИКОЛАЕВА Инна Павловна,** кандидат технических наук, доцент,
доцент Высшей школы механики и процессов управления ФМИ
*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*
*(195251, Россия, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д.29, e-mail: inna4i4n@mail.ru)*

**Аннотация.** Деревянные опоры воздушных линий электропередачи и линий связи, изготавливаемые из бревен круглого сечения, до сих пор широко применяются на территории России. Известно, что при качественной обработке деревянных опор срок их службы составляет 35-40 лет, в течение которого ведутся эксплуатационное обслуживание линий и соответствующие ремонтные работы, например, с использованием приставных лестниц. Под действием климатических явлений происходит постепенное разрушение древесины и соответствующее ослабление прочностных свойств, поэтому возрастают риски обрушения опор под действием ветровой нагрузки и/или падения работника при проведении на высоте эксплуатационных и ремонтных работ. Сравнение изгибных напряжений в основании опоры сплошного и полого круглого сечения столба с неповрежденной древесиной показал большой запас прочности, что позволяет сделать вывод о том, что причиной обрушения опор под действием нагрузок является старение материала, которое может затронуть весь диаметр опоры под влиянием внешних условий окружающей среды в течение срока эксплуатации. Процесс разрушения и старения древесины затрагивает не только видимые глазом нарушения структуры материала.

**Ключевые слова:** работа на высоте, риск, деревянные опоры воздушных линий связи и электропередачи, изгибные напряжения, разрушение древесины, травматизм.

# ABOUT THE OF WOODEN OVERHEAD LINE SUPPORTS POWER TRANSMISSIONS AND COMMUNICATIONS DURING THE OPERATIONAL PERIOD

© The Author(s) 2024

**KAVERZNEVA Tatyana Timofeevna,** candidate of technical sciences, associate professor
Graduate School of Technosphere Safety of Institute of Civil Engineering
*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*
*(195251, Russia., Saint Petersburg, Polytechnicheskaya St, 29, e-mail: kaverztt@mail.ru)*
**SKRIPNIK Igor Leonidovich,** candidate of technical sciences, associate professor

Department of fire safety of technological processes and production
*St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia*
*(196105, Russia., Saint Petersburg, Moskovsky Prospekt, 149, e-mail: ig.skripnick2011@yandex.ru)*
**SENCHENKO Vladimir Alekcandrovich,** chief occupational safety specialist
*PJSC Rostelecom Volgograd Branch*
*(400048, Russia, Volgograd, Zemlyachki str. 18, e-mail: vladimir.senchenko1973@gmail.com)*
**NIKOLAEVA Inna Pavlovna,** candidate of technical sciences, associate professor
Graduate School of Mechanics and Control Processes Physics Mechanical Institute
*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*
*(195251, Russia., Saint Petersburg, Polytechnicheskaya St, 29, e-mail: inna4i4n@mail.ru)*

**Abstract.** Wooden supports for overhead power lines and communication lines, made from round logs, are still widely used in Russia. It is known that with high-quality processing of wooden poles, their service life is 35-40 years, during which operational maintenance of the lines and corresponding repair work are carried out, for example, using ladders. Under the influence of climatic phenomena, there is a gradual destruction of wood and a corresponding weakening of strength properties, therefore, the risks of supports collapsing under the influence of wind load and/or a worker falling when carrying out operational and repair work at height increase. A comparison of bending stresses at the base of a support of a solid and hollow circular section of a pillar with intact wood showed a large margin of safety, which allows us to conclude that the cause of the collapse of supports under the influence of loads is the aging of the material, which can affect the entire diameter of the support under the influence of external environmental conditions during the service life. The process of destruction and aging of wood affects not only visible damage to the structure of the material.

**Keywords:** work at height, risk, wooden supports of overhead communication and power lines, bending stresses, destruction of wood, injuries.

***Для цитирования:*** *Каверзнева Т.Т. Об обрушении деревянных опор воздушных линий электропередачи и связи в эксплуатационном периоде / Т.Т. Каверзнева, И.Л. Скрипник, В.А. Сенченко, И.П. Николаева // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 2(66). – С. 220-226. – EDN: PNAMTQ.*

**Введение.** На территории России эксплуатируются широко разветвленные сети воздушных линий связи (ВЛС) и электропередач (ВЛЭ), причем, их эксплуатация подразумевает соответствующее техническое обслуживание и ремонт сетей, когда работникам требуется осуществить непосредственный подъем по опорным столбам к линиям. При проведении таких работ не всегда удается использовать автоподъемник, который является наиболее безопасным способом обслуживания опор. Когда сложно подъехать к опоре (например, в случае пересеченной или болотистой местности), при подъеме на опору применяют приставные лестницы.

Материал, из которого изготавливают опоры линий электропередач и ВЛС, достаточно разнообразен: дерево, железобетон, металл (сталь), сплавы и композитные материалы, разрабатываются новые опытные конструкции [1,2]. Ранее в России в качестве материала для опор использовали дерево, как самый доступный материал, обладающий рядом ценных свойств. После антисептической пропитки [3-5] специальными составами, которые предотвращают гниение древесины, срок службы деревянных опор значительно повышается и может составлять 35-40 лет [1,2]. Срок службы деревянных опор уступает сроку службы железобетонных и металлических (оцинкованных или периодически окрашиваемых) опор [2] и может составлять в определённых климатических условиях 50 лет и более. К ценным свойствам древесины относится способность хорошо работать на изгиб, поэтому деревянные столбы ВЛЭ выдерживают и ветровые нагрузки, и нагрузки от обледенения лучше, чем опоры из железобетона. Стоимость металлических и железобетонных опор значительно превышает стоимость деревянных с учетом процессов изготовления, транспортировки и установки на местности. Для тяжелых железобетонных конструкций необходимо применять соответствующую технику, а деревянные опоры при необходимости могут устанавливаться вручную. Выбор того или иного материала для опор чаще всего обусловливается экономическими соображениями, а также наличием соответствующего материала в месте сооружения линии.

Таким образом, деревянные опоры составляют достойную конкуренцию металлическим или железобетонным аналогам [6], особенно для климатических зон со сложными метеорологическими условиями с постоянными сильными ветрами и зимними обледенениями. Так как дерево – легкий материал, то поврежденная деревянная опора чаще всего не падает и удерживается на проводах, тогда как повреждение железобетонных опор сопровождается обрывом проводов, падением соседних опор. Диэлектрические свойства древесины позволяют не допустить утечки токов и обеспечивают высокий уровень грозозащиты.

Деревянные опоры круглого сечения в системах ВЛС и ВЛЭ широко применяются по всей территории РФ, особенно в сельской местности. С течением времени под действием окружающей среды в деревянных опорах, заглубленных в землю, начинаются процессы разрушения: обычно процесс гниения затрагивают сердцевину нижней части опоры, контактирующей с почвенными слоями зем-

ли, а затем постепенно увеличивается, захватывая все большую площадь. Самой нагруженной частью опоры является основание опоры, в котором как раз в большей степени происходят процессы гниения сердцевины под действием влаги, поступающей из воздуха, а также под действием влаги в почвенном слое, примыкающем к заглубленной в землю части опоры. Надо заметить, что и металлические опоры ржавеют и разрушаются [7] как раз в месте соприкосновения с почвой. Процесс разрушения сильно зависит от погоды, то есть он определяется климатическими поясами, сезонными дождями и температурными перепадами, усиливается ветровыми нагрузками. Приходится учитывать и происходящие климатические изменения и аномалии, которых ранее не наблюдалось. К тому же, в дереве может быть небольшой брак, который скажется позднее и который выявить очень сложно на этапе ввода конструкции в эксплуатацию. Поэтому сложно предсказать время, когда опора упадет самостоятельно, а внешний осмотр не всегда позволяет оценить масштаб разрушения. Обработанная снаружи древесина внешне может неплохо выглядеть, а образовавшийся в течение времени внутренний дефект может привести к падению человека (вместе с опорой и лестницей). На рисунке 1 представлен вид состояния сломанной деревянной опоры, по которому можно утверждать, что основание подверглось значительному разрушению (гниению).

Рисунок 2 демонстрирует, как выглядит картина результата падения опоры ВЛС (под действием веса работника и приставной лестницы). Работник поднимался по приставной лестнице на опору для выполнения запланированных работ, в процессе подъема опора не выдержала и сломалась у основания столба, что повлекло за собой падение человека с высоты и получение тяжелой травмы [8].

Существует специальная процедура контроля состояния деревянных опор согласно Правилам по охране труда при выполнении работ на объектах связи, утвержденных Приказом Минтруда России от 07.12.2020 № 867н (раздел XXIX), но практика свидетельствует о том, что только опытный работник может в полной мере выполнять этот контроль. Снизить роль человеческого фактора могут помочь технические средства контроля, например, прибор АКОД (Аппаратура контроля опор деревянных) уфимского предприятия ООО «Квазар» способен определять глубину гниения деревянной опоры с определенной погрешностью в измерении.



*Рисунок 1 – Вид состояния структуры древесины у основания столба после обрушения опоры*



*Рисунок 2 – Результат падения опоры воздушной линии связи под действием веса работника и приставной лестницы*

При обслуживании сетей, в том числе при ремонте, работники осуществляют подъем на опоры или с помощью автоподъемника (что безопасней с точки зрения риска падения работника с высоты) или с помощью приставных лестниц, когда существуют трудности доступности использования подъемников. Обслуживание сетей с помощью приставных лестниц выглядит существенно опасней, частично разрушенная у основания опора под действием веса самой лестницы и веса человека обычно заваливается в противоположную от края приставленной к опоре лестницы. В [8] описан несчастный случай в 2023 году в г. Старая Русса, когда выполнялись работы по организации ВЛС по столбовым деревянным опорам. Причем, при осмотре опора визуально выглядела целой. Мастер по обслуживанию абонентов, надев страховочную привязь, поднялся на высоту 3 метров, чтобы установить анкерную линию перед началом работ над дорожным знаком, когда опора стала падать (еще до закрепления страховочной привязи). В результате падения мастер упал с приставной лестницы и получил черепно-мозговую травму, сотрясение головного мозга, перелом поперечных отростков позвонков, закрытый перелом обеих костей левого предплечья. Подобные падения с высоты являются наиболее распространенным видом несчастных случаев во всем мире [9-14]. Так как не удается избежать тяжелых травм, связанных с падением работников с высоты при обслуживании ВЛС и ВЛЭ, использующих деревянные опоры, то приходится признать, что разработанные и существующие на сегодняшний момент меры обеспечения безопасности не достаточны.

**Методология.** Целью исследования является снижение риска падения работников при подъеме на деревянные опоры ЛЭП и ВЛС путем своевременного выявления состояния «старения» (гниения) древесины в наиболее опасном сечении опоры, а также обосновать недостаточность визуального контроля при оценке сроков безопасной эксплуатации деревянных опор.

Для решения поставленных задач использовался математический аппарат курса сопротивления материалов для описания и анализа изгибных напряжений в опасном сечении опоры. В представленных моделях рассматривались изгибные напряжения в наиболее нагруженном прикорневом сечении опоры под действием веса работника и веса приставной лестницы (расчетная модель 1), под действием добавленной к ним ветровой нагрузки (расчетная модель 2) и рассматривалась модель 3 кольцевого сечения опоры для описания разрушения сердцевины древесины. Полученные напряжения сравнивались с допускаемыми напряжениями для древесины сосны, еще не подверженной процессам «старения».

**Результаты.** Рассмотрим основные возможные варианты обрушения деревянных опор (табл. 1), предположив, что в начале эксплуатации опора не имеет брака и соответствует необходимым запасам прочности.

В начальный период эксплуатации опоры, имеющей здоровую древесину, еще не ощутившую влияния внешней среды, расчетный гарантируемый запас прочности опоры позволяет обрушение до начала эксплуатации считать «невероятным» событием.

*Таблица 1 – Основные причины обрушения деревянных опор и мероприятия по обеспечению безопасности работ по техническому обслуживанию и ремонту сетей, когда работникам требуется осуществить непосредственный подъем по опорным столбам к линиям*

| Возможные причины обрушения деревянных опор | Мероприятия по обеспечению безопасности работ |
|---|---|
| Обрушение опоры под действием веса человека и приставной лестницы | - расчетный гарантируемый запас прочности опоры, позволяющий обрушение до начала эксплуатации считать «невероятным» событием (брак в начальный срок эксплуатации во внимание не принимаем) |
| Обрушение опоры в результате разрушения (гниения), затронувшего, в первую очередь, *наружные* слои опоры под действием внешних природных факторов (главным образом, у основания столба) | - антисептическая пропитка специальными составами древесины<br>- внешний осмотр на наличие загнивания древесины<br>- при выявлении загнивания осуществляется проверка ее степени (глубины) с помощью щупа/иглы/ буравчик (делают не менее трёх проколов по окружности и определяют среднюю глубину поверхностного загнивания опоры) и рассчитывается эквивалентный диаметр здоровой части древесины. Если диаметр здоровой части древесины меньше допустимого, опора подлежит замене |
| Обрушение опоры в результате разрушения (гниения), затронувшего, в первую очередь, *внутреннюю* часть (сердцевину) опоры под действием внешних природных факторов (главным образом, у основания столба), когда внешний осмотр не выявил явных дефектов | - регламент отсутствует<br>- требуются дополнительные исследования |

В расчетной модели 1 подтвердим запас прочности (по изгибающим напряжениям) опоры под действием сил веса тела работника и приставной лестницы. Оценим, как вес человека с прислоненной к деревянной опоре приставной лестницей влияет на изгибающие напряжения в корневом (самом нагруженном) сечении опоры. При расчете [15] исходим из неизменности характеристик материала (сосны).

Для решения поставленных задач примем следующие допущения:

Вес человека (принимаем с запасом, стандарт соответствует 80 кг) $F=100$ кг.

Диаметр опоры столба $d=2\cdot R=20$ см.

Вес приставной лестницы: 25 кг.

Материал опоры: Сосна, допускаемые напряжения для сосны $[\sigma]$=100 кг/см$^2$ =10 МПа.

Высота опоры: $H$=*6м=600* см.

Опора имеет постоянное по высоте сечение.

Угол наклона приставной лестницы к вертикальной оси опоры составляет $\alpha$=*20°*.

Рассмотрим действие всех сил на опору. Когда человек поднимается по лестнице, его вес сосредотачивается по направлению самой лестницы. Разложим силу $F$ на две составляющие: $F_1$ и $F_2$. Схема представлена рисунком 3.

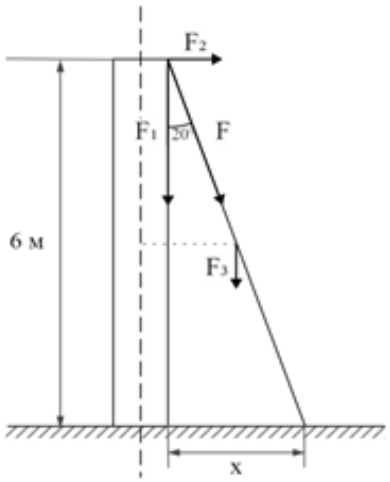



*Рисунок 3 – Схема действующих на опору сил*

Тогда:

$F_1$=*F·cos 20°*=94 кг,

$F_2$=*F·sin 20°*=34,3 кг.

Обозначим вес самой лестницы $F_3$=25 кг.

Определим расстояние: $x$=*tg(20°)·600*=218,4 см.

Рассмотрим поперечное сечение опоры в ее основании и определим величины моментов (произведение сил на плечо), возникающих от действия указанных выше сил:

$M_2$ ($F_2$)=$F_2$·$H$=20520 кг·см.

$M_1$ ($F_1$)=$F_1$·$R$=940 кг·см.

$M_3$ ($F_3$)=$F_3$·*(x/2+R)*=2980 кг·см.

Обозначим через $N$ продольную силу, которая складывается из двух составляющих сил $F_1$ и $F_3$:

$N$=$F_1$ + $F_3$

Используя принцип независимости действия сил (суперпозиции), определим нормальные напряжения:

$\sigma$=*N/A+M/W,*

где $A$ и $W$ – геометрические характеристики поперечного сечения: $A$ – площадь поперечного сечения, а $W$ – момент сопротивления площади поперечного сечения.

Используя соотношения: $A$=*(*$\pi$·$d^2$*)/4* и $W$=*(*$\pi$·$d^3$*)/32*, определяем $N$=119 кг и $M$=$M_1$+$M_2$+$M_3$=940+20520+ +2980=24440 кг·см,

$\sigma$=*(119·4)/(*$\pi$·$20^2$*)*+*(24440·32)/(*$\pi$·$20^3$*)*=31,48 кг/см$^2$ = 3,148 МПа.

Сравниваем полученное значение напряжения с допускаемым значением напряжения, которое для древесины сосны и ели составляет 100 кг/см$^2$ =10 МПа.

Полученное значение значительно меньше допускаемого: 3,148 МПа<$[\sigma]$=10 МПа. Сосна хорошо держит изгибные напряжения, что подтвердил расчет. Таким образом, если бы материал древесины сохранял свои свойства на протяжении всего времени эксплуатации опоры (не подвергся процессу старения), то имелся бы значительный запас прочности, гарантирующий безопасную эксплуатацию деревянной опоры при подъеме работника на опору при помощи приставной лестницы.

На втором этапе (расчетная модель 2) попробуем добавить к представленной картине влияние ветровой нагрузки и выясним, насколько она сможет повлиять на напряжения. В работе [16], например, исследовалось состояние опоры ВЛЭ под действием ветровых нагрузок на провода. Проведенный в статье анализ показал, что напряженно-деформированное состояние опор зависит от ветровых нагрузок на провода электросети. В нашем климатическом поясе скорость ветра далека от скорости ветра, например, тайфуна, которая составляет около 40 м/с, поэтому выберем скорость 24,4 м/с. Это значение скорости соответствует давлению ветра 72 кг/м$^2$ или 72·10$^{-4}$ кг/см$^2$.

Изгибающий момент от силы ветра составляет:

$\sigma_{ветра}$=72·10$^{-4}$·600·300=1200 кг·см.

Определим напряжение с учётом ветровой нагрузки:

$\sigma$=*(119·4)/(*$\pi$·$20^2$*)*+*((24440+1200)·32)/(*$\pi$·$20^3$*)*=33 кг/см$^2$ =3,3 МПа < $[\sigma]$=10 МПа.

Таким образом, вклад ветровой нагрузки в общее напряжение незначителен и составляет менее 5%. При желании можно было бы рассчитать и для больших скоростей ветра, но известно, что работы на высоте можно проводить только до 15 м/с. Проведенные выше оценочные расчеты верны при предположении, что мы имеем дело с древесиной неповрежденной, неизношенной и без наличия эффекта усталости материала. Поэтому на третьем этапе (расчетная модель 3) предположим, что процесс повреждения затронул только сердцевину столба, то есть рассмотрим поперечное сечение основания опоры в виде кольца, «выкинув» ту часть древесины, которая подверглась процессам гниения. Определим, как такая полая конструкция опоры сможет выдержать изгибные напряжения в сечении у основания столба, а конкретно, при каком соотношении внутреннего и наружного диаметров изгибающие напряжения будут критичны, то есть соизмеримы с допускаемыми для сосны.

Рассмотрим случай с поперечным сечением в виде кольца, где $d_{внут}$ – диаметр внутренней окружности, а $d_{нар}$ – диаметр наружной окружности. Введем обозначение $\alpha$=$r_{внут}$ / $r_{нар}$ =$d_{внут}$ / $d_{нар}$.

В этом случае геометрические характеристики поперечного сечения имеют вид:

*A=(*$\pi$·$d_{нар}^2$*) / 4·(1-*$\alpha^2$*)*

$W=(\pi \cdot d_{нар}^{3})/32 \cdot (1-\alpha^{\wedge}4)$.

Определим коэффициент $\alpha$ из условия прочности, при этом не будем учитывать напряжения от продольной силы $\sigma=|N|/A$, так как их величина незначительна по сравнению с напряжениями, возникающими при деформации изгиба $\sigma=|M|/W$.

Тогда

$\sigma=|M|/W=(24440 \cdot 32)/(\pi \cdot 20^{3} \cdot (1-\alpha^{4}))=[\sigma]=100$ кг/(см$^2$) или $24440 \cdot 32=100 \cdot \pi \cdot 20^{3} \cdot (1-\alpha^{4})$.

Из этого выражения получаем: $\alpha$=0,90; $d_{нар}$=20 см, $d_{внут}$=18 см.

Полученный результат проверим с учетом напряжения от продольной силы:

$\sigma=N/A=(119 \cdot 4)/(\pi \cdot 20^{2} \cdot (1-0,9^{2}))$=2 кг/см$^2$ =0,2 МПа

Напряжение от изгибающего момента при $\alpha$=0,9 составляет:

$\sigma=M/W=(24440 \cdot 32)/(\pi \cdot 20^{3} \cdot (1-0,9^{4}))$=91,6кг/см$^2$ =9,16 МПа

Суммарное напряжение с учетом обеих составляющих будет равно:

$\Sigma\sigma=\sigma(N)+\sigma(M)$=0,2+9,16=9,36 МПа<$[\sigma]$=10 МПа.

Оценочный расчет показал, что изгибающие напряжения в сечении основания столба для полой конструкции опоры только при соотношении внутреннего и наружного диаметров $\alpha$=0,9 могут быть критичны, то есть близки к допускаемым для сосны. Так как по существующим правилам при толщине здорового слоя меньше 2 см деталь подлежит немедленной замене, то этот случай представляется маловероятным. Даже при значительном сокращении площади поперечного сечения опоры изгибающие напряжения в опасном сечении не превысят допустимых значений при условии отсутствия «старения» древесины.

**Обсуждение.** Расчеты показали, что во всех рассмотренных выше моделях (при принятых исходных допущениях) изгибающие напряжения в сечении у основания столба меньше допускаемых для материала сосны, что должно гарантировать прочность конструкции. Однако обрушения столбов, хоть и редкие, но бывают; также имеются зарегистрированные несчастные случаи, связанные с обслуживанием ВЛС и ВЛЭ во время подъема работников на опоры. Для ответа на вопрос, почему же происходят такие обрушения, можно предположить ошибочность в допущениях, которые принимались при проведенных расчетах. В приведенных выше оценочных расчетах изгибные напряжения сравнивались с допускаемым для сосны, равным 10 МПа. Но эта характеристика древесины не является неизменной на протяжении срока эксплуатации опоры. Древесина опоры постепенно во всем сроке эксплуатации 35÷40 лет под влиянием внешних погодных явлений теряет свои первоначальные прочностные характеристики, причем, изменения касаются не только ее сердцевины или только наружного слоя. Даже если внешний вид опоры не вызывает сомнений в ее прочности (роль «человеческого фактора» в оценке здесь особенно велика [17-19]), прочностные характеристики материалов с течением времени меняются. Данных о том, насколько и с какой скоростью происходят эти изменения, нет.

Существуют технические решения, позволяющие снизить нагрузку на верхний край опоры при подъеме на нее с помощью приставной лестницы, например, верхнюю часть лестницы можно закрепить с помощью опорных штанг, упирающихся в землю по разные сторонам от лестницы в распор [8]. Практическое применение этого решения позволит снизить риск падения опоры с человеком, но не исключит полностью. Поэтому очевидна необходимость совершенствования методического аппарата оценки технического состояния опор ВЛЭ с учетом типовых эксплуатационных дефектов, в том числе износа [20, 21].

**Выводы.** Сравнение изгибных напряжений в основании опоры сплошного и полого круглого сечения столба с неповрежденной древесиной показал большой запас прочности, что позволяет предположить, что причиной обрушения опор под действием нагрузок является прежде всего «старение» материала. «Старение» древесины (под влиянием внешних условий окружающей среды в течение срока эксплуатации) может затронуть значительную часть диаметра опоры.

Проведенное исследование показало необходимость создания базы данных, отражающей изменение прочностных характеристик древесины, используемых для опор ВЛЭ и ВЛС, от времени ее эксплуатации в разных климатических поясах. Роль «человеческого фактора» при существующем контроле состояния деревянных опор для оценки доли поврежденной древесины высока, поэтому возможны ошибочные действия как при проведении самой процедуры, так и во время принятия контролером решения об ее итогах.

Целесообразно для снижения роли «человеческого фактора» для выявления загнивания древесины применять современные технические средства контроля и развивать методика оценки технического состояния опор ВЛЭ с учетом типовых эксплуатационных дефектов.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Быковская Л.В., Штрамель А.В. Сравнительный анализ опор линий электропередачи // Инновационная наука – 2022. – № 4-2. – С. 44-46.

2. Жмуренков Ю.С., Шаменюк В.П., Кулик А.Ю. Опоры воздушных линий электропередач: назначение, виды, материалы // Актуальные проблемы энергетики. – 2017. – С. 129-132.

3. Н.О. Мельников, Н.И. Акинин, В.П. Павлова, С.А. Максименко. Современные трудновымываемые препараты для биологической защиты деревянных опор линий электропередач и связи // Химическая промышленность сегодня. – 2019. – № 1. – С. 32-37.

4. Леонович, О.К. Анализ биостойкости пропитанной древесины опор линий связи электропередач / О.К. Леонович, М.С. Козловская // Механическая технология древесины: Республиканский межведомственный сборник / Белорусский технологический институт. Том Выпуск 14. – Минск:

Вышэйшая школа, 1984. – С. 64-66.

5. Патент РФ № 2377121. Антисептик нефтяной пропиточный для консервации древесины (варианты). Твердохлебов В.П., Козлов И.А., Касюк Ю.М., Дружинин О.А., Хандархаев С.В., Пичугин В.М., Кинзуль А.П., Марьясов А.Н., Бюлл. № 36, 2009.

6. Шергунова Н.А. Пропитанные деревянные опоры – идеальный материал для воздушных линий электропередач // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2007. – №2(20). – С. 163-167.

7. Чувашкина В.В. Оценка долговечности металлических конструкций опор линий электропередач // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций: сб. ст. всеросс. науч.-технич. конф. (5 декабря 2019 г., г. Саранск). В 1 ч. Саранск. 2019. – С. 470-476.

8. Сенченко В.А., Каверзнева Т.Т., Пушенко С.Л., Стасева Е.В. Совершенствование мер безопасности при выполнении работ с применением лестниц на неустойчивых деревянных опорах воздушных линий связи и линий электропередач // Кадровик. – 2023. – № 8. – С. 97-104.

9. Hsiao H., Simeonov P., Pizatella T., Stout N., ... Weeks J., Extension-ladder safety: Solutions and knowledge gaps, International Journal of Industrial Ergonomics, Volume 38, Issues 11–12, Pages 959-965, Publication Year 2008, https://doi.org/10.1016/j.ergon.2008.01.011

10. Erika M. Plinera, Na JinSeo, Kurt E.Beschorner, Factors affecting fall severity from a ladder: Impact of climbing direction, gloves, gender and adaptation, Applied Ergonomics, Volume 60, April 2017, Pages 163-170. https://doi.org/10.1016/j.apergo.2016.11.011

11. Helen M.Ackland, David V.Pilcher, Owen S.Roodenburg, Susan A.McLellan, Peter A.Cameron, D. JamesCooperab, Danger at every rung: Epidemiology and outcomes of ICU-admitted ladder-related trauma, Injury Volume 47, Issue 5, May 2016, Pages 1109-1117. https://doi.org/10.1016/j.injury.2015.12.016

12. Kari K. Häkkinen, Jussi Pesonen, Erkki Rajamäki, Experiments on safety in the use of portable ladders, Journal of Occupational Accidents Volume 10, Issue 1, June 1988, Pages 1-19. https://doi.org/10.1016/0376-6349(88)90002-8

13. Socias CM, Chaumont Menéndez CK, Collins JW, Simeonov P; Centers for Disease Control and Prevention (CDC). Occupational ladder fall injuries - United States, 2011. MMWR Morb Mortal Wkly Rep. 2014 Apr 25;63(16):341-6. Erratum in: MMWR Morb Mortal Wkly Rep. 2014 May 9;63(18):416. PMID: 24759655; PMCID: PMC4584774.

14. Chien-Chi Chang, Wen-Ruey Chang, Simon Matz, The effects of straight ladder setup and usage on ground reaction forces and friction requirements during ascending and descending, Safety Science, Volume 43, Issue 7, August 2005, Pages 469-48. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2005.08.002

15. Державин Б.П., Жаринов М.Ю., Лукьянов А.М., Мелешонков Е.И. Расчет балок на изгиб и кручение: Методические указания по дисциплине «Сопротивление материалов». – М.: МГУПС (МИИТ), 2014. – 44с.: ил.

16. Кожевников А.Н. Анализ напряженно-деформированного состояния опоры воздушных линий электропередачи под действием ветровых нагрузок на провода электросети / А.Н. Кожевников, Д.А. Красноруцкий; науч. рук. В.Е. Левин // Наука. Промышленность. Оборона: тр. 19 Всерос. науч.-техн. конф., Новосибирск, 18-20 апр. 2018 г. В 4 т. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – Т. 1. – С. 51-54.

17. Сенченко В.А., Каверзнева Т.Т. Учет микротравм на производстве как основа предупреждения и минимизации опасности повреждения здоровья работников / Охрана труда и техника безопасности на промышленных предприятиях. – 2022. – № 1. – С. 10-15.

18. Филиппова А.А. Анализ методов формирования культуры безопасности работников железнодорожного транспорта / Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. – 2022. – № S2. – С. 135-136.

19. Aditya R.H. An overview of the development of safety systems in industrial control systems / Journal of Mechanical Science and Engineering. – 2021. – Т. 8. – № 1. – С. 19-22.

20. Бурнышева, Т.В. Методика оценки технического состояния опор воздушных линий электропередачи с учетом типовых эксплуатационных дефектов / Т.В. Бурнышева, А.Н. Кожевников // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2021. – № 2(110). – С. 2. – DOI 10.18698/2308-6033-2021-2-2053.

21. Привалов Е.Е., Синельников М.М., Леваев Д.Г. Об эксплуатации деревянных опор воздушных линий электропередач // В сборнике: Физико-технические проблемы создания новых технологий в агропромышленном комплексе. Сборник научных статей по материалам Международной научно-практической конференции. – 2017. – С. 238-240.

*Статья поступила в редакцию 17.03.2024*
*Статья принята к публикации 17.06.2024*

УДК: 542.65
EDN: HNBOUO

# РАЗРАБОТКА БИОПЛАСТИКА НА ОСНОВЕ ХИТОЗАНА, БИОМАССЫ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ И ГЛИЦЕРИНА

© Автор(ы) 2024

SPIN: 4006-9116
AuthorID: 1072490

**СЕРГЕЕВ Олег Евгеньевич**, аспирант
*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*
*(Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, e-mail: ole13g@yandex.ru)*
SPIN: 9964-2034
AuthorID: 439213
ORCID: 0000-0002-5914-6210
ScopusID: 57210316571

**ПОЛИТАЕВА Наталья Анатольевна**, доктор технических наук, профессор,
профессор Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства
*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*
*(Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, e-mail: politaevana1971@gmail.com)*
SPIN: 1449-6732
AuthorID: 1232788
ORCID: 0000-0001-9623-057X
ScopusID: 58419740600

**ВЕЛЬМОЖИНА Ксения Алексеевна**, аспирант
*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*
*(Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, e-mail: anizhomlev@mail.ru)*

**Аннотация.** Статья представляет обзор перспективного направления в области экологически устойчивых материалов – биопластиков на основе хитозанового геля. В статье рассматриваются основные преимущества использования биопластиков из хитозана, включая их биоразлагаемость, биосовместимость и низкую токсичность. Описывается процесс производства биопластиков из хитозана и их потенциальное применение в различных отраслях, таких как упаковка, медицина, сельское хозяйство и текстильная промышленность. В работе представлены результаты экспериментов по созданию биопластиков из хитозанового геля с использованием добавок. В качестве добавок использовались биомасса микроводорослей, глицерин и крахмал. В работе осуществлен визуальный анализ поулченных образцов и определен наиболее эффективный композитный состав для создания биопластиков. Помимо этого, был произведен анализ мирового рынка производства пластиков и биопластиков. В результате был разработан способ производства биоразлагаемого пластика и определен наиболее оптимальный состав пластика в качестве перспективной альтернативы полиэтилену.

**Ключевые слова:** биопластик, биоразлагаемые пластмассы, хитозан, крахмал, микроводоросли, биодеградация, биомасса хлореллы, пластик, устойчивое развитие, отходы.

# DEVELOPMENT OF BIOPLASTIC BASED ON CHITOSAN, MICROALGAE BIOMASS, AND GLYCEROL

© The Author(s) 2024

**SERGEEV Oleg Yevgenevich**, postgraduate student
*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*
*(Russia, 195251, St. Petersburg, st. Politekhnicheskaya, 29, e-mail: ole13g@yandex.ru)*
**POLITAEVA 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, e-mail: politaevana1971@gmail.com)*
**VELMOZHINA Ksenia Alekseevna**, postgraduate student
*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*
*(Russia, 195251, St. Petersburg, st. Politekhnicheskaya, 29, e-mail: anizhomlev@mail.ru)*

**Abstract.** The article provides an overview of a promising direction in the field of environmentally sustainable materials - bioplastics based on chitosan gel. The article discusses the key advantages of using chitosan-based bioplastics, including their biodegradability, biocompatibility, and low toxicity. The process of producing bioplastics from chitosan is described, along with their potential applications in various industries such as packaging, medicine, agriculture, and textiles. The study presents the results of experiments on creating bioplastics from chitosan gel using additives. Microalgae biomass, glycerol, and starch were used as additives. Visual analysis of the obtained samples was carried out, and the most effective composite composition for creating bioplastics was determined. Additionally, an analysis of the global

market for plastic and bioplastic production was conducted. As a result, a method for producing biodegradable plastic was developed, and the most optimal plastic composition was identified as a promising alternative to polyethylene.

**Keywords:** bioplastic, biodegradable plastics, chitosan, starch, microalgae, biodegradation, Chlorella biomass, plastic, sustainable development, waste.

***Для цитирования:*** *Сергеев О.Е. Разработка биопластика на основе хитозана, биомассы микроводорослей и глицерина / О.Е. Сергеев, Н.А. Политаева, К.А. Вельможина // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 2(66). – С. 227-234. – EDN: HNBOUO.*

**Введение.** С каждым годом во всем мире растут мощности производства пластмасс. Согласно статистике, начиная с 1950 года наблюдается увеличение общего количества произведённых пластмасс с 1,5 миллионов тонн до 367 миллионов тонн в 2020 году [1] (по иным источникам до 460 миллионов тонн в 2019 году [2]). Ежегодный прирост мощностей производства пластмасс оценивается в среднем в 8,4%. К 2022 году мировой объем производства пластмасс оценивается в 400,3 миллиона тонн [3]. На рисунке 1 отчетливо виден постоянный рост общего объема производства пластмасс.

Важно отметить положительную тенденцию, связанную со значительным увеличением количества пластмасс, произведенных на биологической основе (с 1,1 млн т в 2018 году к 2,3 млн т в 2022 году).

Странами с наиболее высоким спросом на пластмассы являются Германия, Италия, Франция, Испания, Великобритания и Польша. В 2015 году эти страны потребляли 24,6%, 14,3%, 9,6%, 7,7%, 7,5% и 6,3% от общего объема соответственно [4].

Согласно докладу, представленному экологической организацией Earth Action, Россия занимает 3 место среди стран нерационального использования пластиковых отходов в мире (рис. 2) [5].




*Рисунок 1 – Мировые мощности производства пластмасс*

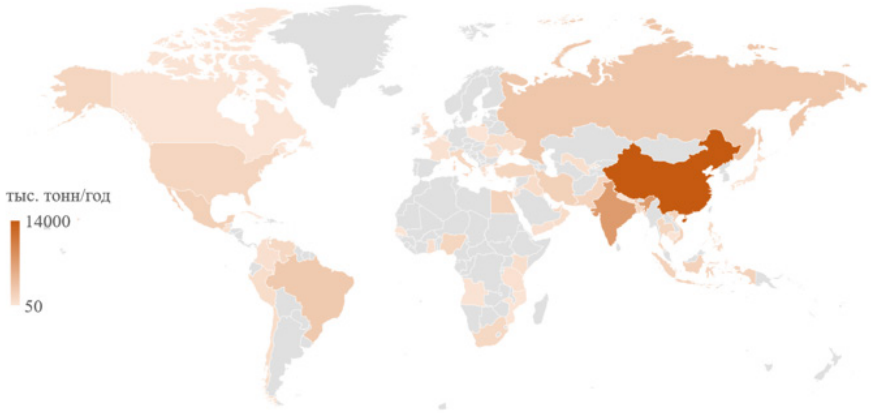



*Рисунок 1 – Общее количество нерационально обработанных пластиковых отходов по странам (тыс. тонн/год)*

На долю 12 стран, представленных на диаграмме, приходится 60% нерационального использования пластиковых отходов в мире: Китая, Индии, России, Бразилии, Мексики, Вьетнама, Ирана, Индонезии, Египта, Пакистана, США и Турции. Соответственно, на долю остальных 205 стран приходится 40% от общего количества нерационально обработанных отходов.

Россия относится к странам с умеренным уровнем загрязнения (страны, не обеспечивающие эффективного управления своими отходами и негативного воздействия на окружающую среду). Ожидаемый объем ненадлежащего обращения с отходами в 2024 году в РФ составит 3182063 тонны пластика. В России общий объем произведенных пластиковых отходов составляет 4,717,346 тонн. Экспорт пластиковых отходов из страны составляет 16,867 тонн, что составляет 0.4% от общего объема отходов. Импорт пластиковых отходов в страну составляет 35,097 тонн, что составляет 0.7% от общего объема отходов страны. Загрязнение воды микропластиком составило 50,831 тонн, а загрязнение химическими добавками – 13,482 тонны.

Наращивание темпов производства пластика и накопление пластиковых отходов представляют серьезную угрозу для окружающей среды и человеческого здоровья по нескольким причинам. Большинство пластиковых отходов недостаточно быстро разлагаются, что приводит к загрязнению почвы, водных ресурсов и морей. Это негативно сказывается на биоразнообразии и экосистемах, а также создает угрозу для морских животных, птиц и растений. Микропластик, образующийся в результате разложения крупных пластиковых отходов, может проникать в пищевые цепочки и в конечном итоге попадать в организм человека через пищу и воду.

Существует две основные категории пластмасс: на биологической основе (полученные из биогенного сырья) и на ископаемой основе (полученные из материалов на основе нефти) [6]. Биоразлагаемые пластики на биологической основе идентичны своим аналогам на нефтяной основе несмотря на то, что производятся из биогенных ресурсов [7].

Биопластики представляют собой решение описанных выше глобальных проблем, связанных с пластиками. Биопластики производятся из возобновляемых ресурсов и способны быстрее разлагаться в окружающей среде, не оставляя долгосрочного негативного следа. При производстве биопластиков используются растительные и другие возобновляемые источники, что способствует сокращению использования нефти и других нефтепродуктов. Также процесс производства биопластиков обычно требует меньше энергии и вызывает меньше выбросов парниковых газов по сравнению с традиционными пластиками.

В 2021 году общий объем производства биопластиков составил около 2,36 млн тонн, из которых примерно 1,55 млн тонн представляют собой разлагаемые материалы, а 0,86 млн тонн – неразлагаемые материалы [7]. Общий объем рынка биопластиков на данный момент составляет порядка 4 миллионов тонн [8]. При этом в процентном соотношении от общего объема производства пластмасс биопластики занимают только 0,5% от общего объема мирового рынка производства пластмасс [9]. Согласно представленным прогнозам, мировые мощности производства биопластиков увеличатся к 2028 году с 2,2 миллионов тонн в 2023 году к 7,5 миллионам тонн (рис. 3).

Этот рост может быть обусловлен расширением областей применения биопластиков в связи с тенденцией замены пластмасс на основе ископаемых видов топлива более экологичными альтернативами. Кроме того, это также может быть связано с возрастающим осознанием необходимости перехода к экономике замкнутого цикла на экологическом, экономическом и социальном уровнях [12-14].

Важно отметить, что индустрия биопластиков работает практически на полную мощность.

Средний коэффициент использования в 2023 году составил 82% (производство 1,79 млн тонн к производственным мощностям 2,18 млн тонн) (рис. 4) [11].

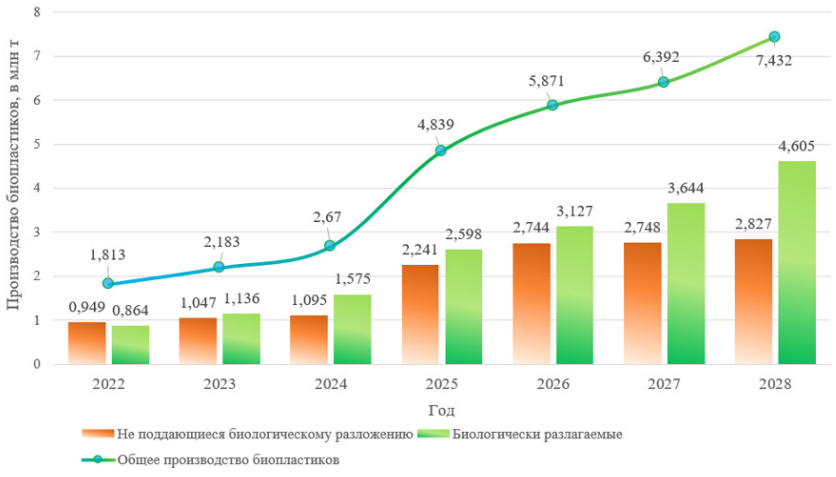



*Рисунок 3 – Прогнозируемый объем производимых биопластиков до 2028 г*

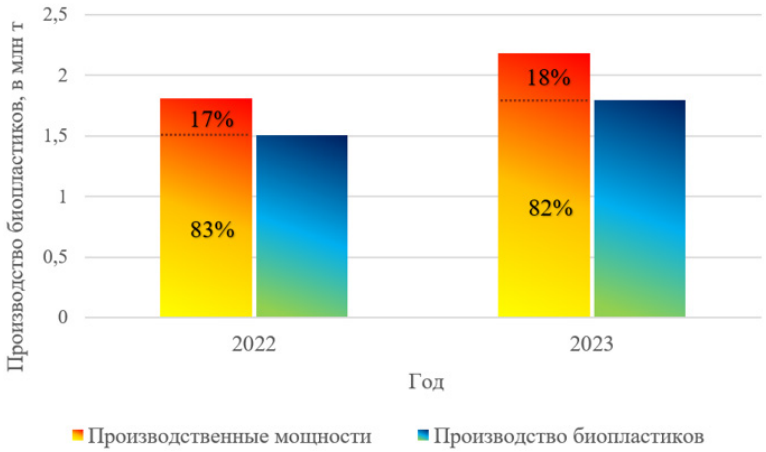



*Рисунок 4 – Показатели использования биопластиков в 2023 г*

Существует несколько методов производства биопластиков, каждый из которых имеет свои преимущества и применяется в зависимости от конкретных целей производителя.

**Методология.** Целью данного исследования является разработка биопластиков на основе хитозанового геля с использованием различных добавок. Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Анализ мирового рынка производства пластиков и биопластиков.

2. Постановка эксперимента по получению биопластиков на основе хитозанового геля с добавлением биомассы микроводорослей.

3. Постановка эксперимента по получению биопластиков на основе хитозанового геля с добавлением глицерина.

4. Постановка эксперимента по получению биопластиков на основе хитозанового геля с добавлением крахмала.

5.Оценка внешнего вида, прочности, эластичности и усадки полученных биопластиков после высыхания.

6. Определение наиболее эффективного композиционного состава для получения биопластиков.

Хитозан представляет собой биологически активный полимер, который образует волокна и способен разлагаться под воздействием естественных ферментов [15]. При разработке биопластика использовался хитозановый гель, полученный путем растворения гранул хитозана в 3% растворе уксусной кислоты: на 4 грамма хитозана использовалось 100 мл уксусной кислоты.

Биомасса микроводорослей также является одним из компонентов экспериментального биопластика. Для создания биоразлагаемой пленки использовалась сухая биомасса микроводорослей Хлорелла. Она имеет сферическую форму и диаметр от 2 до 10 микрометров, не имеет жгутиков [16].

Глицерин добавляют в некоторые экспериментальные биопластики для изменения свойств будущих пластиковые пленки. Глицерин – органическое соединение, простейший представитель трехатомных спиртов [17]. Глицерин придает отвержденной биопластиковой пленке дополнительную эластичность и уменьшает хрупкость. Для приготовления биоразлагаемой пленки был использован спиртовой глицерин.

В некоторые экспериментальные биопластики добавляют крахмал, чтобы изменить свойства будущей пластиковой пленки. Крахмал представляет собой смесь полисахаридов амилозы и амилопектина, мономером которых является альфа-глюкоза. Для приготовления биоразлагаемой пленки был использован кукурузный крахмал.

Для создания пленки из биопластика была предложена следующая технология, которая была реализована в лабораторных условиях (рис. 5).

Используемое в работе оборудование:

1) инфракрасная лампа IKZK-250;

2) центрифуга Thermo Scientific Sorvall RC12BP Plus;

3) весы Shimadzu ATX224;

4) испытателбная машина INSTRON 5943;

5) спектрометр FSM 1201;

6) сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) JSM 7001F (JEOL, Япония).

Культивирование микроводорослей осуществлялось в фотобиореакторе (1) объемом 500 мл, оборудованном магнитной мешалкой (2) и якорем (3), размещенными на дне установки (рис. 6а). Постоянное перемешивание биомассы микроводорослей поддерживалось при помощи аэрационных установок, расположенных на дне фотобиореактора. Барботирующее устройство состояло из насоса-аэратора (4) и трубки для подачи кислорода (5). В верхней части фотобиореактора была расположена инфракрасная лампа (6) мощностью 10900-11300 Лк. Люминесцентные лампы (7) мощностью 2200-2800 Лк были расположены по всему периметру фотобиореактора, обеспечивая равномерное освещение биомассы с фотопериодом 12 ч. Процесс культивирования биомассы микроводорослей в лабораторном фотобиораекторе показан на рисунке 6б.

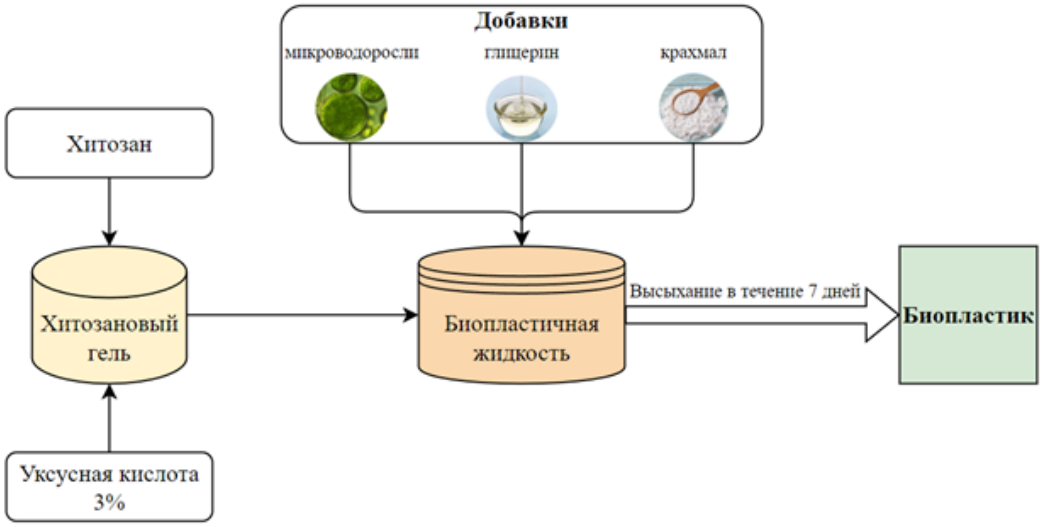
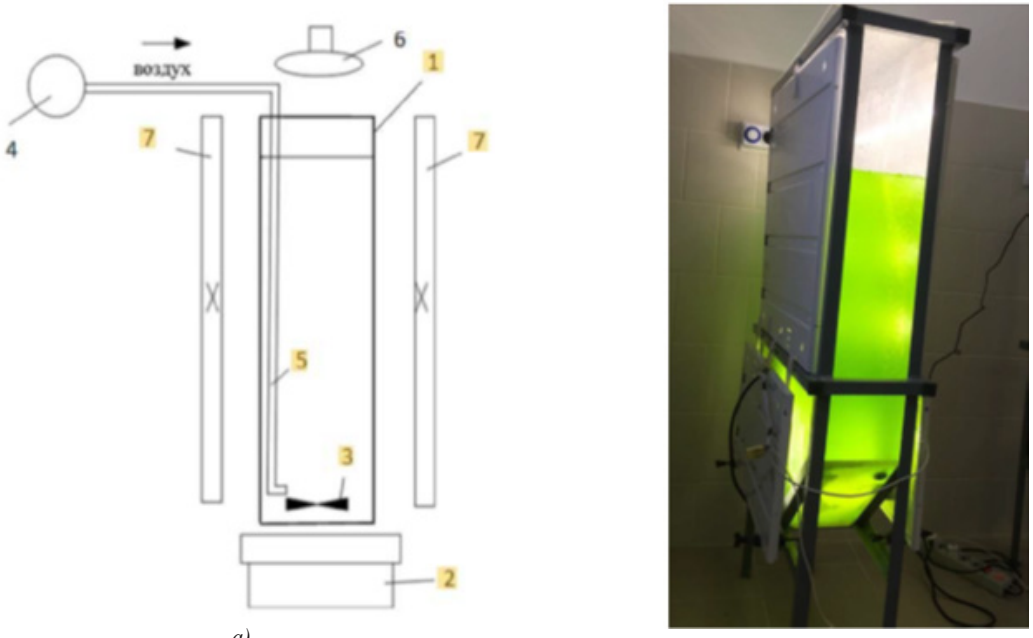



*Рисунок 5 – Технология получения биопластика*




*а)* *б)*

*Рисунок 6 – Фотобиореактор для культивирования микроводорослей, где а) схема фотобиореактора, б) культивирование микроводорослей в лабораторных условиях*

Для отделения биомассы микроводорослей от раствора с питательной средой была использована центрифуга. Далее была осуществлена сушка получившейся биомассы микроводорослей.

Для получения биопластиков сначала было произведено смешивание сухих ингредиентов с хитозановым гелем и используемыми добавками. Затем на гладкой поверхности были созданы квадратные формы со сторонами длиной 10 см. Этот шаг необходим из-за того, что смесь для создания биопластиков имела высокую текучесть и не способна удерживать свою форму самостоятельно. Затем смесь заливалась в формы примерно на 3 мм от уровня пластиковой подложки.

После застывания смесь превращается в биопластиковую пленку. Для этого образцы выдерживались в аэробной среде без воздействия влаги при температуре воздуха 23-25°C и относительной влажности 60-40% в течение 7 дней.

Компонентный состав биопластиков на основе хитозанового геля с добавлением биомассы микроводорослей (рис. 7):

1. 99% хитозана + 1% микроводорослей (24,82 г хитозана + 0,25 г микроводорослей);
2. 98% хитозана + 2% микроводорослей (24,5 г хитозана + 0,5 г микроводорослей);
3. 97% хитозана + 3% микроводорослей (24,25 г хитозана + 0,75 г микроводорослей);
4. 96% хитозана + 4% микроводорослей (24 г хитозана + 1 г микроводорослей);
5. 95% хитозана + 5% микроводорослей (23,75 г хитозана + 1,25 г микроводорослей).



*а)* *б)*

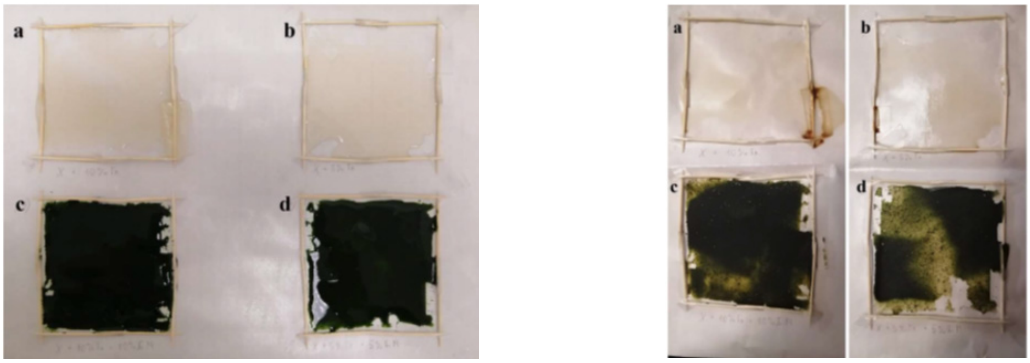
*Рисунок 7 – Биопластиковые пленки на основе хитозана и микроводорослей, где а) образцы перед затвердеванием, б) образцы после затвердевания*

Компонентный состав биопластиков на основе хитозанового геля с добавлением биомассы микроводорослей и глицерина (рис. 8):

1. 90% хитозана + 10% глицерина (18 г хитозана + 2 г глицерина);
2. 95% хитозана + 5% глицерина (19 г хитозана + 1 г глицерина);
3. 80% хитозана + 10% микроводорослей + 10% глицерина (8 г хитозана + 1 г микроводорослей + 1 г глицерина);
4. 90% хитозана + 5% микроводорослей + 5% глицерина (9 г хитозана + 0,5 г микроводорослей + 0,5 г глицерина).

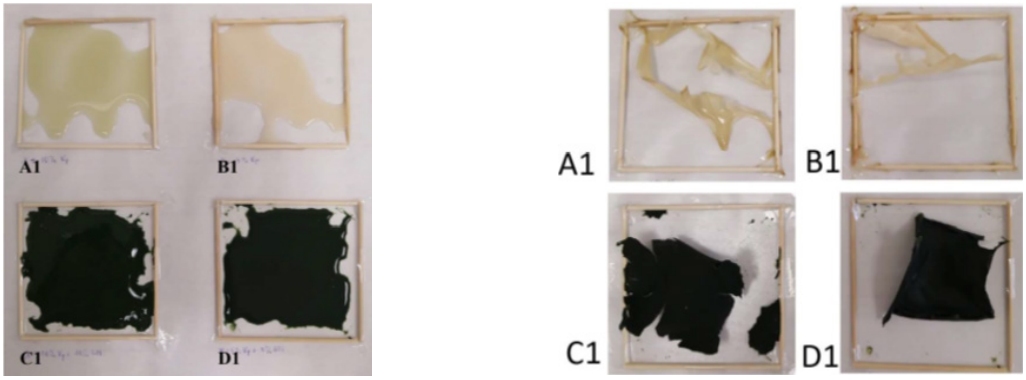
Компонентный состав биопластиков на основе хитозанового геля с добавлением биомассы микроводорослей и крахмала (рис. 9):

1. 90% хитозана + 10% крахмала (18 г хитозана + 2 г крахмала);
2. 95% хитозана + 5% крахмала (19 г хитозана + 1 г крахмала);
3. 80% хитозана + 10% микроводорослей + 10% крахмала (8 г хитозана + 1 г микроводорослей + 1 г крахмала);
4. 90% хитозана + 5% микроводорослей + 5% крахмала (9 г хитозана + 0,5 г микроводорослей + 0,5 г крахмала).




*а)* *б)*

*Рисунок 8 – Биопластиковые пленки на основе хитозана, микроводорослей и глицерина, где а) образцы перед затвердеванием, б) образцы после затвердевания*




*а)* *б)*

*Рисунок 9 – Биопластиковые пленки на основе хитозана, микроводорослей и крахмала, где а) образцы перед затвердеванием, б) образцы после затвердевания*

**Результаты.** На основе визуального анализа всех высушенных образцов составлена таблица 1.

Таким образом, для получения биопластика со свойствами, близкими к полиэтиленовой пленке, необходимо добавить в хитозановый гель пластификатор глицерин (эксперимент 2). Наиболее удачной композицией является 80% хитозанового геля + 10% сухой биомассы микроводорсолей + 10% глицерина.

*Таблица 1 – Визуальная оценка сухих образцов биопластиков*

| Эксперимент № | Компоненты | Номер образца | Композиционный состав | Прочность | Эластичность | Усадка, % |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Хитозан + микроводоросли | 1 | 99% хитозана + 1% микроводорослей | - | - | 30 |
| | | 2 | 98% хитозана + 2% микроводорослей | - | - | 25 |
| | | 3 | 97% хитозана + 3% микроводорослей | - | - | 25 |
| | | 4 | 96% хитозана + 4% микроводорослей | - | - | 20 |
| | | 5 | 95% хитозана + 5% микроводорослей | + | - | 10 |
| 2 | Хитозан + микроводоросли + глицерин | a | 90% хитозана + 10% глицерина | + | + | 10 |
| | | b | 95% хитозана + 5% глицерина | + | + | 15 |
| | | c | 80% хитозана + 10% микроводорослей + 10% глицерина | + | + | 5 |
| | | d | 90% хитозана + 5% микроводорослей + 5% глицерина | + | + | 10 |
| 3 | Хитозан + микроводоросли + крахмал | A1 | 90% хитозана + 10% крахмала | - | - | 50 |
| | | B1 | 95% хитозана + 5% крахмала | - | - | 60 |
| | | C1 | 80% хитозана + 10% микроводорослей + 10% крахмала | - | - | 40 |
| | | D1 | 90% хитозана + 5% микроводорослей + 5% крахмала | - | - | 40 |

**Обсуждение.** Результаты научного проекта по разработке биопластиков имеют важное значение для устойчивого развития всего мира, способствуя снижению экологической нагрузки на городскую среду и стимулируя инновационное развитие в регионе. Разработка биоразлагаемых пластиков позволит сократить использование традиционных пластиков и снизить негативное воздействие на экосистемы рек и заливов. Помимо этого, проект способствует повышению экологической осознанности в обществе и формированию экологически ответственного потребительского поведения. Были определены возможные области применения результатов работы: пищевая и медицинская промышленность (производство биоразлагаемых упаковок для продуктов или медицинских приспособлений), сельскохозяйственная промышленность (производство биоразлагаемых упаковок для удобрений и семян), текстильная промышленность, бытовая промышленность (производство биоразлагаемой посуды и столовых приборов) и производство упаковки для косметических продуктов.

**Выводы.** Производство биопластиков представляет собой перспективное направление для достижения целей устойчивого развития в современном обществе. Инновационные материалы на основе органических компонентов могут стать идеальной заменой традиционным пластмассам, способной стать решением проблемы глобального распространения микропластиков. При этом оценка возможного внедрения данных материалов показала его универсальность и востребованность в таких областях промышленности, как производство продуктов питания, столовых приборов, косметических продуктов и много другое. Однако, важно продолжать исследования в данной области для апробации других композиционных составов биопластиков с целью поиска наиболее подходящей замены пластикам по их ключевым физико-химическим свойствам.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Gustiawati, Beatriks & Herdiansyah, Herdis & Frimawaty, Evi. (2023). A Review of the Implementation of Sustainable Plastic Waste Management. International Journal of Science and Society. 5. 690-705. 10.54783/ijsoc.v5i5.937.

2. Jochmann, Matthew. (2023). An Examination of The Current & Potential Roles of Biologically Derived Plastics in the Global Plastic Supply Chain & An Analysis of Their Production Methods. 10.13140/RG.2.2.10902.63041.

3. Plastics – the fast Facts 2023: [сайт]. – 2023. – URL: https://circularplasticsnl.org/wp-content/uploads/2023/11/Plastics-thefastfacts2023-1.pdf (дата обращения: 01.05.2024).

4. Шарапов Р.В. Глобальные экологические катастрофы: миф или реальность? // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. – 2011. – № 1. – С. 14-16.

5. Plastic Overshoot Day – Report 2024, EA-Earth Action, 2024.

6. Ali, Sameh & Adel, Esraa & Elsamahy, Tamer & Altohamy, Rania & Li, Fanghua & Kornaros, Michael & Zuorro, Antonio & Zhu, Daochen & Sun, Jianzhong. (2023). Bioplastic production in terms of life cycle assessment: A state-of-the- art review. Environmental Science and Ecotechnology. 15. 100254. 10.1016/j.ese.2023.100254.

7. S.S. Ali, T. Elsamahy, E.A. Abdelkarim, R. Al-Tohamy, M. Kornaros, H.A. Ruiz, T. Zhao, F. Li, J. Sun Biowastes for biodegradable bioplastics production and end-of-life scenarios in circular bioeconomy and biorefinery concept. Bioresour. Technol., 363

(2022).

8. Вознесенский С.С., Сергеев А.А., Мироненко А.Ю., Братская С.Ю., Колчинский В.А. Влияние относительной влажности среды на оптические и волноводные характеристики тонких хитозановых пленок // Письма ЖТФ. 2012. – Т. 38. – № 5. – С. 56-62.

9. Eurostat: [сайт]. – 2024. – URL: https://ec.europa.eu/eurostat/news/euro-indicators (дата обращения: 06.05.2024).

10. E. Bioplastics Bioplastics market development update 2021: [сайт]. – 2021. – URL: https://docs.european-bioplastics.org/publications/market_data/Report_Bioplastics_Market_Data_2021_short_version.pdf (дата обращения: 06.05.2024).

11. Bioplastics market development update 2023: [сайт]. – 2023. – URL: https://www.european-bioplastics.org/market / (дата обращения: 06.05.2024).

12. S. Singha, M. Mahmutovic, C. Zamalloa, L. Stragier, W. Verstraete, A.J. Svagan, O. Das, M.S. Hedenqvist. Novel bioplastic from single cell protein as a potential packaging material. ACS Sustain. ACS Sustainable Chem. Eng., 9 (2021), pp. 6337-6346.

13. S.G. Mastropetros, K. Pispas, D. Zagklis, T. Elsamahy, S. Ali, J. Sun, M. Kornaros. Polyhydroxyalkanoates (PHAs) production from microalgae cultivated in wastewater. Handbook of Research on Algae as a Sustainable Solution for Food, Energy, and the Environment, IGI Global (2022). – P. 585-609.

14. Y.K. Leong, P.L. Show, C.W. Ooi, T.C. Ling, J.C.W. Lan. Current trends in polyhydroxyalkanoates (PHAs) biosynthesis: insights from the recombinant Escherichia coli. J. Biotechnol., 180 (2014), pp. 52-65.

15. Горбов А.И., Менделеев Д.И. Глицерин, способ определения // Энциклопедический словарь Брокгауза и Ефрона: в 86 т. (82 т. и 4 доп.). – СПб. С.1890-1907.

16. Rane, K.D., Hoover, D.G. An evaluation of alkali and acid treatment for chitosan extraction from fungi, Process Biochemistry. – 118 с.

17. Арзамасцев О.С. Интенсификация процесса получения пленок хитозана / О.С. Арзамасцев, С.Е. Артеменко, В.Ф. Абдуллин //Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2011. – № 4 (60). – Вып. 2. – С. 112- 114.

*Статья поступила в редакцию 30.04.2024*
*Статья принята к публикации 17.06.2024*

УДК: 614.849
EDN: VTTFRM

# ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ОЦЕНКИ ВЗРЫВОПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ПРОИЗВОДСТВА И ОБРАЩЕНИЯ ВОДОРОДСОДЕРЖАЩЕГО ГАЗА

© Автор 2024
SPIN: 6923-0111
AuthorID: 1165305
ORCID: 0000-0002-3927-5613

**ТИМОШЕНКО Артем Леонидович**, адъюнкт факультета подготовки кадров высшей квалификации
*Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России*
*(196105, Санкт-Петербург, Московский пр, д. 149, e-mail: artem18181@gmail.com)*

**Аннотация.** В данном исследовании обсуждается проблема оценки взрывопожарной опасности объектов производства и обращения водородсодержащего газа. Обусловлена актуальность исследования, поставлены задачи по разработке экспериментально-расчетного метода оценки взрывопожарной опасности объектов производства и обращения водородсодержащего газа. Автором представлены результаты анализа методологических и нормативных основ, получены сведения по частотам реализации аварийных событий в зависимости от типа оборудования объектов, области промышленности и поражающего эффекта, построена критериальная модель оценки взрывопожарной опасности технологического оборудования, разработан метод моделирования аварийной утечки водородсодержащего газа из технологического оборудования в вентилируемом помещении, получены экспериментальные данные методом моделирования аварийной утечки в вентилируемом помещении объекта производства и обращения водородсодержащего газа, разработан алгоритм оценки взрывопожарной опасности объектов производства и обращения водородсодержащего газа, предложена система введения газовых средств тушения пожара в водородопровод.

**Ключевые слова:** взрывопожарная опасность, объектов производства и обращения водородсодержащего газа, частоты, нормативные документы, стратификация, аварийная утечка, критериальная модель, метод моделирования, изменение концентрации, газоанализатор.

# BASIC PRINCIPLES OF EXPLOSION AND FIRE HAZARD ASSESSMENT OF HYDROGEN GAS PRODUCTION AND HANDLING FACILITIES

© The Author 2024
**TIMOSHENKO Artem Leonidovich**, 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: artem18181@gmail.com)*

**Abstract.** This study discusses the problem of assessing the explosion and fire hazard of hydrogen gas production and handling facilities. The relevance of the study is determined, and the tasks of developing an experimental-calculation method for assessing the explosion and fire hazard of hydrogen gas production and handling facilities are set. The author presents the results of analysis of methodological and normative bases, obtains information on frequencies of realisation of emergency events depending on the type of equipment of objects, the field of industry and striking effect, constructs a criterion model of an estimation of explosion and fire danger of the technological equipment, develops a model of emergency leakage of hydrogen gas from the technological equipment in a ventilated room, obtains experimental data by the method of modelling of emergency leakage in a ventilated room about the explosion and fire danger of hydrogen gas.

**Keywords:** explosion and fire hazard, hydrogen gas, frequencies, regulations, stratification, accident leakage, criterion model, modelling method, concentration variation, gas analyser.

***Для цитирования:*** *Тимошенко А.Л. Общие принципы оценки взрывопожарной опасности объектов производства и обращения водородсодержащего газа / А.Л. Тимошенко // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 2(66). – С. 235-249. – EDN: VTTFRM.*

**Введение.** В связи с утверждением Плана мероприятий – «дорожной карты» и Концепции развития водородной энергетики в Российской Федерации, определяющей цели и задачи развития водородной энергетики до 2050 года, в которых важнейшей задачей развития водородных технологий является осуществление комплекса научно-технологических мероприятий, поддержку научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по интенсификации методов производства водородсодержащего газа и дальнейшее внедрение в промышленность. При этом в документе определены место и роль водородной энергетики в обеспечении энергетической безопасности России [1].

Водородсодержащий газ в больших количествах используется в разных промышленных секторах, при этом с повышением производственных потребностей возрастают производственные объёмы. Согласно прогнозам аналитическо-консалтинговой компании «*GlobalData*», мировые мощности по выработке ВСГ с высокой долей вероятности к 2030 году достигнут отметки в 14 миллионов тонн в год. Это значение в

20 раз превышает мощность производства в настоящее время. В связи с увеличением потенциала в сфере генерации водородсодержащего газообразного сырья в различных промышленных секторах, как правило, увеличивается количество аварийных ситуаций и катастроф, следовательно, встает проблема обеспечения пожарной и промышленной безопасности [2].

В то же время существует ряд системных ограничений, сдерживающих развитие водородной энергетики. Одними из главных проблем при обеспечении промышленной и пожарной безопасности в сфере производства водородсодержащего газа является ограниченность нормативно-правовой базы в области водородной энергетики, в том числе норм обеспечения безопасности. В связи с этим возникает необходимость в пересмотре и уточнении полученных знаний, технологий и опыта эксплуатации объектов производства водородсодержащего газа. Помимо этого, отличительные от других горючих газов физико-химические (высокий коэффициент диффузии и низкая вязкость) и взрывопожароопасные свойства ВСГ способствуют появлению таких эффектов как текучесть и стратификация, что в свою очередь, существенно усложняет численное моделирование распространения тяжелых аварий. Данный факт обуславливает невозможность применения методик оценки взрывопожарной опасности на объектах производства углеводородного газа, при оценке взрывопожарной опасности на объектах производства водородсодержащего газа, по причине существенного отличия физико-химических и пожаровзрывоопасных свойств углеводородных и водородсодержащих газов [3,4].

К таким методикам следует отнести следующие нормативные документы: Приказ Ростехнадзора от 03.11.2022 № 387 «Об утверждении Руководства по безопасности «Методические основы анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах» [5], Приказ МЧС России от 14 ноября 2022 г. № 1140 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности», Приказ МЧС РФ от 10 июля 2009 г. № 404 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах» ГОСТ Р 54142-2010 Менеджмент рисков. Руководство по применению организационных мер безопасности и оценки рисков. Методология построения универсального дерева событий, Приказ Ростехнадзора от 28.11.2022 № 415 «Об утверждении Руководства по безопасности «Методика оценки последствий аварий на взрывопожароопасных химических производствах», Приказ Ростехнадзора от 28.11.2022 № 410 «Об утверждении Руководства по безопасности «Методика оценки риска аварий на технологических трубопроводах, связанных с перемещением взрывопожароопасных газов», Приказ Ростехнадзора от 28.11.2022 № 411 «Об утверждении Руководства по безопасности «Методика оценки риска аварий на технологических трубопроводах, связанных с перемещением взрывопожароопасных жидкостей», Приказ Ростехнадзора от 28.11.2022 № 414 «Об утверждении Руководства по безопасности «Методика оценки риска аварий на опасных производственных объектах нефтегазоперерабатывающей, нефте- и газохимической промышленности», Приказ Ростехнадзора от 12.09.2023 № 331 «Об утверждении Руководства по безопасности «Методика установления допустимого риска аварии при обосновании безопасности опасных производственных объектов нефтегазового комплекса», Приказ Ростехнадзора от 22.12.2022 № 454 «Об утверждении Руководства по безопасности «Методика оценки риска аварий на опасных производственных объектах магистрального трубопроводного транспорта газа», Приказ Ростехнадзора от 29.12.2022 № 478 «Об утверждении Руководства по безопасности «Методические рекомендации по проведению количественного анализа риска аварий на опасных производственных объектах магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов», Приказ Ростехнадзора от 17.02.2023 № 69 «Об утверждении Руководства по безопасности «Методические рекомендации по проведению количественного анализа риска аварий на конденсатопроводах и продуктопроводах», Приказ Ростехнадзора от 25.07.2023 № 276 «Об утверждении Руководства по безопасности «Методические рекомендации по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на угольных шахтах», ГОСТ Р 12.3.047-2012. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля [6].

Таким образом, актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки и научного обоснования метода оценки взрывопожарной опасности объектов производства и обращения водородсодержащего газа.

Огромный вклад в развитие принципов оценки взрывопожарной опасности водородсодержащих газов, разработку принципов обеспечения водородной безопасности, предупреждению детонации ВСГ и тушению водородных пожаров внесли В.В. Азатян, А.А. Борисов, Б.Е. Гельфанд, В.С. Бабкин, С.М. Когарко, А.Н. Баратов, А.Я. Корольченко, В.К. Макеев, И.А. Болодьян, Ю.Н. Шебеко, С.Г. Цариченко, С.В. Пузач, Г.Л. Гендель, С.Ю. Григорьев, Е.В. Никонова, А.А. Лукьянченко, В.Ю. Навценя, Р.В. Прозоров и другие ученые. Однако в этих подходах отсутствует возможность оценки взрывопожарной опасности на основе отнесения технологического объекта к определенной категории уровня взрывопожарной опасности, отсутствует четкий алгоритм оценки взрывопожарной опасности объектов производства и обращения водородсодержащего газа, не применяются методы моделирования, связанные с использованием *CFD*-методов, машинного обучения и нейросетей в части аварийных утечек ВСГ, не исследованы частоты реализации аварийных событий в зависимости от типа оборудования объектов, области промышленности и

поражающего эффекта.

Целью настоящего исследования является снижение уровня взрывопожарной опасности объектов получения и обращения водородсодержащего газа.

Для достижения поставленной цели необходимы проведение анализа методологических и нормативных основ, получение сведений по частотам реализации аварийных событий в зависимости от типа оборудования объектов, области промышленности и поражающего эффекта, построение критериальной модели оценки взрывопожарной опасности технологического оборудования, разработка модели аварийной утечки водородсодержащего газа из технологического оборудования в вентилируемом помещении, получение экспериментальных данных методом моделирования аварийной утечки в вентилируемом помещении (макете) объекта производства и обращения водородсодержащего газа, разработка алгоритма оценки взрывопожарной опасности объектов, разработка рекомендаций для обеспечения нормативного обеспечения взрывопожарной безопасности на объектах получения и обращения водородсодержащего газа.

**Методология.** В исследовании использовались классические и современные частные методы исследования, такие как анализ и синтез источников информации как отечественных, так и зарубежных издательств, анализ статистических данных, с помощью которых подтверждена актуальность темы исследования и получены расчетные данные по частотам реализации аварийных событий; математическая обработка результатов исследований, метод экспертных оценок, экспериментальные и компьютерные методы моделирования.

Согласно ФЗ-123 [7], здание объекта производства и обращения ВСГ относится к классу функциональной пожарной опасности Ф5.1 и подлежит категорированию в соответствии с СП 12.13130.2009 [8] и разделению на классы пожаро- и взрывоопасных зон в соответствии с Правилами устройства электроустановок [9]. Это предопределяет основные технические и организационные решения по обеспечению пожаровзрывобезопасности объекта.

К примеру, в соответствии пунктом 7.3.41 [9] помещение электролизной отнесится к классу взрывоопасной зоны В-Iа. В то же время, согласно [10] помещение электролизной, в котором возможно выделение водорода – категория по взрывопожарной опасности – повышенная взрывопожароопасность (А).

Одним из предложенных решений проблемы оценки рисков на объектах производства и обращения водородсодержащего газа является получения расчетных данных по частотам реализации аварийных событий на основе статистических данных по аварийности на рассматриваемых объектах в зависимости от типа оборудования объектов, области промышленности и поражающего эффекта. Для этого выполнен сбор, обработка, проверка, анализ статистических данных на объектах генерации и обращения водородсодержащего газа, полученных из официальной базы данных водородных инцидентов и аварий *Hydrogen incidents and accidents database* (*HIAD* 2.1), созданной Европейской комиссией по безопасности водорода [11, 12].

На основе анализа данных были получены частоты реализации аварийных событий в зависимости от типа оборудования объектов, области промышленности и поражающего эффекта на объектах производства и обращения водородсодержащего газа (табл. 1, 2, 3).

*Таблица 1 – Частоты возникновения аварий для различных типов оборудования объектов на объектах получения и обращения водородсодержащего газа*

| Наименование оборудования | Частота возникновения аварии |
|---|---|
| Резервуары; емкости, сосуды | $5{,}95238 \cdot 10^{-5}$ |
| Компрессоры, насосы | $1{,}85185 \cdot 10^{-5}$ |
| Технологические аппараты под давлением | $0{,}0001 \cdot 10^{-4}$ |
| Транспорт | $6{,}61376 \cdot 10^{-5}$ |
| Химические реакторы | $1{,}71958 \cdot 10^{-5}$ |
| Технологические трубопроводы | $3{,}7037 \cdot 10^{-5}$ |
| Технологическое оборудование с жидким водородом | $9{,}25926 \cdot 10^{-6}$ |

*Таблица 2 – Частоты реализации поражающих эффектов на объектах получения и обращения водородсодержащего газа*

| Поражающий эффект | Частота возникновения эффекта |
|---|---|
| Взрыв | $8{,}59788 \cdot 10^{-5}$ |
| Пожар | $7{,}40741 \cdot 10^{-5}$ |
| Утечка без воспламенения | $5{,}68783 \cdot 10^{-5}$ |
| Угроза аварии | $9{,}12698 \cdot 10^{-5}$ |

*Таблица 3 – Частоты реализации аварийных событий на различных секторах объектов получения и обращения водородсодержащего газа*

| Сектор | Частота реализации аварии |
|---|---|
| Химическая/нефтехимическая промышленность | $1{,}08466 \cdot 10^{-4}$ |
| Транспортировка и распределительные сети | $6{,}08466 \cdot 10^{-4}$ |
| Атомная энергетика | $1{,}0582 \cdot 10^{-5}$ |
| Лаборатория / НИОКР | $1{,}0582 \cdot 10^{-5}$ |
| Хранение водорода | $2{,}6455 \cdot 10^{-6}$ |
| Производство водорода | $9{,}25926 \cdot 10^{-5}$ |
| Транспортные средства с водородным двигателем | $7{,}14286 \cdot 10^{-4}$ |
| Стационарные топливные элементы | $2{,}6455 \cdot 10^{-5}$ |
| Водородные заправочные станции | $1{,}5873 \cdot 10^{-5}$ |
| Другое/Неизвестное | $1{,}5873 \cdot 10^{-5}$ |

Как было сказано ранее, одной из главных проблем при обеспечении промышленной и пожарной безопасности в сфере производства водородсодержащего газа является недостаточность нормативной базы в сфере безопасности водородной энергетики [13].

К передовым государствам, которые ведут нормативно-правовую работу в сфере водородной безопасности, можно отнести: США, Китай, Японию, Австрию, Канаду, Россию.

В сумме имеется порядка 410 изданных зарубежных нормативных документов в области водородной безопасности. В Российской Федерации количество таких документов составляет порядка 60.

К лидирующим мировым организациям, занимающимися разработкой нормативных документов в сфере безопасности обращения ВСГ, можно отнести *NFPA, AN-SI/CSA, ММО (IMO), МОЗМ (IOML), МЭК (IEC), ООН (United Nations), ASTM International, Compressed Gas Association, U.S. Department of Labor (DOL), UNECE, ISA, OVE, Underwriters Laboratories, CENELEC, EIGA, ИСО (ISO), CSA, SAE, U.S. Department of Commerce (DOC), AIAA, U.S. Department of Transportation (DOT), DIN, IEEE, U.S. Department of Energy (DOE), BSI, EUROCAE* и другие.

В России мониторингом за заинтересованными организациями и органами власти, которые занимаются стандартизацией в сфере всех жизненных циклов обращения ВСГ, является технический комитет по стандартизации «Водородные технологии» (далее – ТК 029). В структуру ТК 029 входит 44 заинтересованных организаций и органов власти, которые обладают компетенциями в сфере водородных технологий.

На данный момент работой в области разработки НД, регулирующих безопасность водородных систем, занимается Национальная ассоциация водородной энергетики (НП НАВЭ) путем собственного аутентичного перевода на русский язык международных стандартов (*ISO*, *IEC* и т.д.) [14].

В данный момент, ведется работа по рассмотрению проекта ГОСТ Р ИСО 19880-1 на основе собственного перевода на русский язык англоязычной версии стандарта, а также внесению изменений в СП 156.13130.2014 в части основных разделов, а также требований к передвижным автомобильным газонаполнительным станциям водорода, требований к топливозаправочному пункту с наличием водорода.

Поскольку для объектов производства и обращения водородсодержащего газа не установлены специальные нормативно-правовые акты и нормативные документы обязательного применения, то пожарная и промышленная безопасность данных объектов регулируется общей системой НПА и НД (рис. 1,2).

Нормативная база США имеет наиболее развитую частную систему правового регулирования обеспечения взрывопожарной безопасности объектов производства и обращения ВСГ (рис. 3).

Одним из предложенных решений проблемы оценки рисков на объектах производства и обращения водородсодержащего газа, в том числе полуколичественной оценки риска объектов измерения и использования, хранения, получения, и транспортировки водородсодержащего газа является разработка модели оценки взрывопожароопасной опасности технологического оборудования объектов (участков) производства и обращения ВСГ (электролизные цеха, склады для хранения емкостей с ВСГ, помещения, в которых размещены ресиверы для водорода, компрессорные помещения, аккумуляторные, газорегуляторные пункты и другие) [15].

В силу этого, необходимым условием оценки уровня взрывопожарной опасности технологического оборудования, в которых обращается ВСГ $Q_i^{\delta}$, является следующая формула (1):

$$Q_i^{\delta} = \begin{cases} x_1 \le x_1^{\text{доп}}; \\ x_2 \le x_2^{\text{доп}}; \\ x_i \le x_i^{\text{доп}}. \end{cases} \quad (1)$$

где $x_i$ – фактическое значение параметра источника взрывопожарной опасности;

$x_i^{доп}$ – допустимое значение параметра источника взрывопожарной опасности.

Для имитации безопасности технологического процесса производства и использования ВСГ, а также для разработки системы гарантирования его безопасности в рамках данного процесса, были выделены ключевые параметры, влияющие на безопасность используемого технологического обо-

рудования, которые разделяются на соответствующие подгруппы:

– исходные (*A*) (задаваемые пользователем);
– допустимые (*B*);
– справочные (*C*);
– расчетные (*D*).

Переменная $x_i$ в данной модели является значением расчетного параметра, влияющего на безопасность используемого водородного оборудования, переменная $x_i^{don}$ – значением допустимого параметра. Остальные переменные (исходные *A* и справочные *C*) являются промежуточными и обеспечивают взаимосвязь между независимой переменной $x_i$ и зависимой переменной $x_i^{don}$, соответственно, зависимые, независимые и промежуточные переменные не равнозначимы.

Кроме этого, произведена оценка степени значимости расчетных параметров методом экспертного оценивания и присвоения им рангового номера. В опросе участвовало 14 экспертов, имеющих соответствующую направлению исследования квалификацию.

В данном случае исследуемые параметры расположились по следующей значимости, а также разделены на подгруппы по степени значимости (табл. 4).

Так, по мнению экспертов, наиболее значимым параметром оказался верхний концентрационный предел распространения пламени.

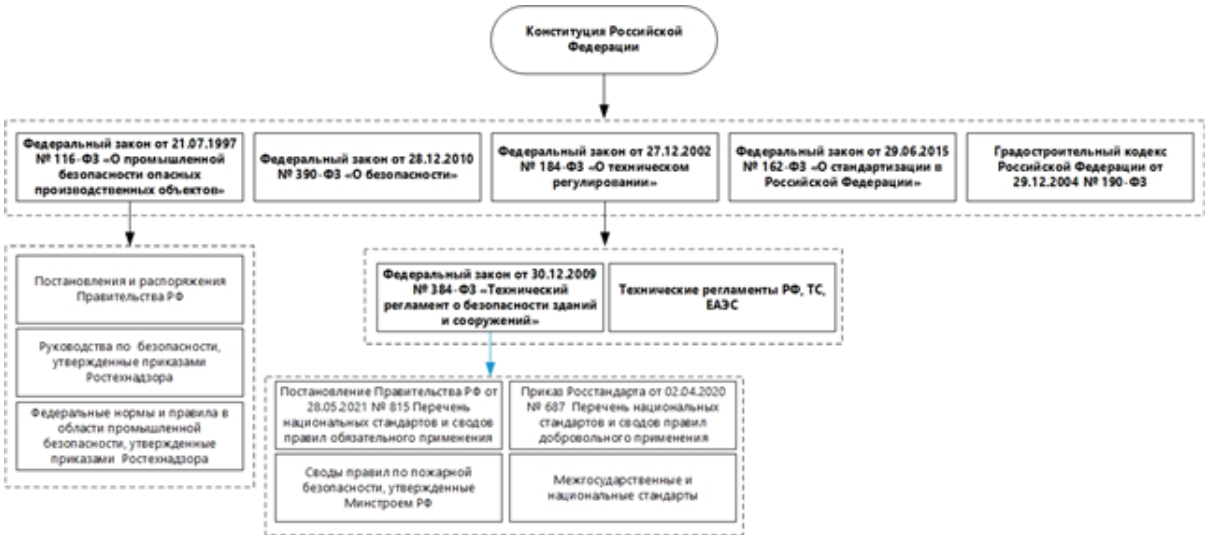



*Рисунок 1 – Структура законодательной базы Российской Федерации в сфере обеспечения промышленной безопасности*

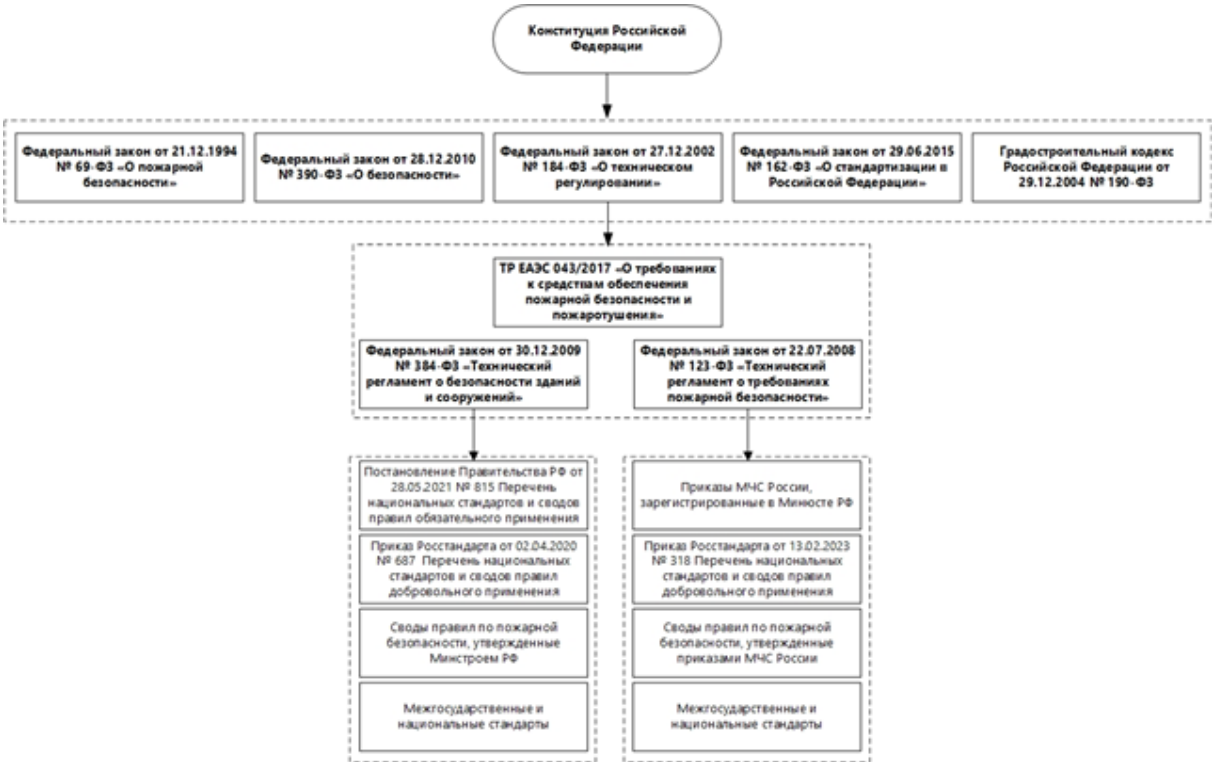



*Рисунок 2 – Структура законодательной базы Российской Федерации в сфере обеспечения пожарной безопасности*

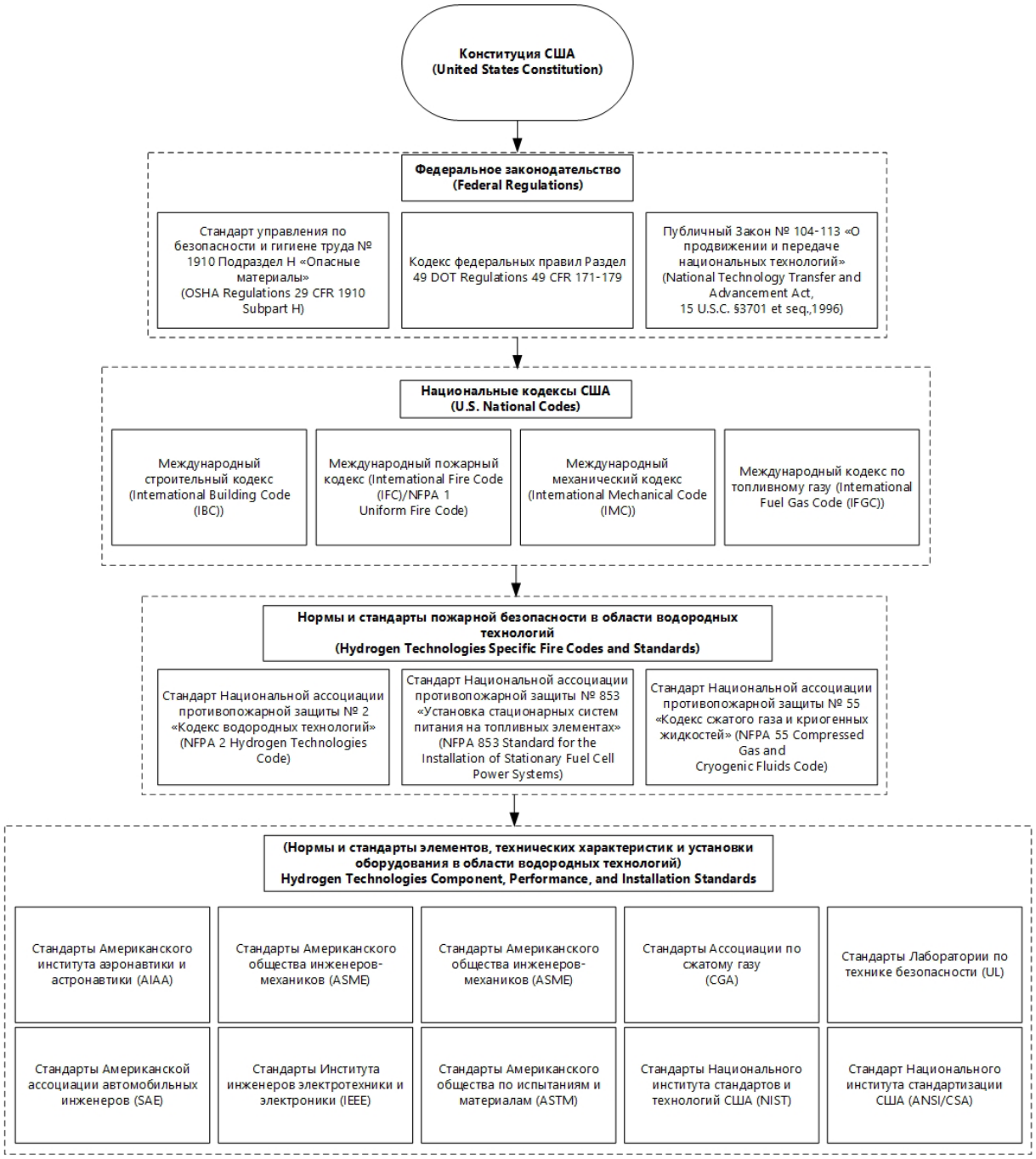



*Рисунок 3 – Структура законодательной базы США в сфере обеспечения водородной безопасности*

*Таблица 4 – Анализ значимости исследуемых параметров*

| Степень значимости | Параметры | Сумма рангов |
|---|---|---|
| Малозначимые | Предельная скорость срыва диффузионного факела $x_7$ | 49 |
| | Минимальная флегматизирующая концентрация газообразного флегматизатора $x_5$ | 66 |
| | Безопасный экспериментальный максимальный зазор $x_1$ | 75 |
| Значимые | Нормальная скорость распространения пламени $x_6$ | 76,5 |
| | Минимальная энергия зажигания $x_{10}$ | 78 |
| | Максимальное давление взрыва $x_4$ | 80 |
| Критически значимые | Нижний концентрационный предел распространения пламени $x_2$ | 85 |
| | Скорость нарастания давления взрыва $x_8$ | 85 |
| | Температура самовоспламенения $x_9$ | 87 |
| | Верхний концентрационный предел распространения пламени $x_3$ | 88,5 |

**Результаты.** Выбор источников взрывопожарной опасности технологического процесса производства и обращения ВСГ был основан на показателях пожарной пожаровзрывоопасности, установленных для газообразных веществ. В соответствии с ФЗ №123 от 22.07.2008 г. и ГОСТ 12.1.044-2018 к перечню показателей, необходимых для оценки пожарной опасности газообразных веществ, относятся 19 показателей, однако не все показатели определяются количественным методом (14) и имеют качественные значения (5) [16].

Состояние безопасности технологического процесса производства и обращения ВСГ было охарактеризовано соответствующим множеством критериев (2):

$$X = \begin{cases} A = (T\text{апп}, P\text{апп}, V\text{апп}, qг, b, l, h, q\text{всг}, т\text{пост}, P\text{труб}, r\text{подв}, r\text{отвод}, L\text{подв}, L\text{отвод}, Q\text{н}, \rho\text{в}, Cp, T\text{в}); \\ B = (\varphi\text{н}(\text{доп.}); \varphi\text{в}(\text{доп.}); \delta\text{бэмз}(\text{доп.}); \Delta P(\text{доп.}); P\text{апп}(\text{доп.}), Su(\text{доп.}); dp/d\tau\ (\text{доп.}); \text{тсам}(\text{доп.}); Wmin(\text{доп.}); u0(\text{доп.}); \varphi\text{ф}(\text{доп.})); \\ C = (T0, M, \varphi\text{н}0, \varphi\text{в}0, Tг, Z, \rho г, Kн, P0, Su0, n*, m*, K, Cp0, \gamma, A, Cст); \\ D = (\varphi\text{н}; \varphi\text{в}; \delta\text{бэмз}; \Delta P; Su; dkp\frac{dp}{d\tau}; Wmin; u0; \varphi\text{ф}, V_{\text{св}}, l\text{к}, V\text{всг}, V\text{труб}, m\text{всг}); \end{cases} \quad (2)$$

где $T_{апп}$ – температура аппарата, К;$P_{апп}$ – давление аппарата, кПа; $V_{апп}$ – объем реакционного сосуда, м$^3$; $q_г$ – удельное объемное количество тепла, необходимое для нагрева горючей смеси от ее начальной температуры $T_{апп}$ до температуры самовоспламенения $t_{св}$, Дж/м$^3$; *b, l, h* – размеры помещения, м; $q_{всг}$ – расход ВСГ, определяемый в соответствии с технологическим регламентом, м$^3$·с$^{-1}$; $\tau_{пост}$ – продолжительность поступления ВСГ в объем помещения, с (120 с, если вероятность отказа системы автоматики превышает 0,000001 в год и не обеспечено резервирование ее элементов; 300 с при ручном отключении трубопроводов); $P_{труб}$ – давление в трубопроводе, кПа; $r_{подв(отвод)}$ – внутренний радиус трубопроводов, м; $L_{подв(отвод)}$ – длина трубопроводов от аварийного аппарата до задвижек, м; $Q_н$ – низшая теплота сгорания вещества, МДж/кг; $\rho_в$ – плотность воздуха до взрыва при начальной температуре Т0, кг·м$^{-3}$; $C_р$ – теплоемкость воздуха, кДж·кг$^{-1}$·К$^{-1}$; $T_в$ – начальная температура воздуха, К; $T_0$ – температура при нормальных условиях, 273 К; *M* – молярная масса смеси, 2,016 кг/кмоль; $\varphi_{н0}$ – нижний концентрационный предел распространения пламени при нормальных условиях (4,0 % (об.)); $\varphi_{в0}$ – верхний концентрационный предел распространения пламени при нормальных условиях (75,0 % (об.)); $T_Г$ – температура горения смеси в воздухе, К; Z – коэффициент участия ВСГ в горении (равен 1); $\rho_г$ – плотность воздуха, кг/м$^3$; $K_н$ – коэффициент, учитывающий негерметичность помещения и неадиабатичность процесса горения (равен 3); $P_0$ – атмосферное давление, 101,3 кПа; $S_{u0}$ – известное значение нормальной скорости при давлении $P_0$ (101,3 кПа) и температуре $T_0$ (273 К), равное 3,06 м/с; *n** и *m** – соответственно барический и температурный показатели; *K* – коэффициент расхода форсунки, равный 0,75; $C_{p0}$ – теплоемкость исследуемой газовой смеси при нормальных условиях, 20,80 кДж/(моль·К); $\gamma$ – показатель адиабаты (коэффициент Пуассона, равный 1,410); *A* – кратность воздухообмена, создаваемого аварийной вентиляцией, с$^{-1}$; $C_{ст}$ – стехиометрическая концентрация в воздухе, % (об.); $\varphi_н$ – расчетное значение нижнего концентрационного предела распространения пламени по смеси газообразного горючего вещества с воздухом, % (об.); $\varphi_в$ – расчетное значение верхнего концентрационного предела распространения пламени по смеси газообразного горючего вещества с воздухом, % (об.); $\delta_{бэмз}$ (БЭМЗ) – фактическое значение максимального экспериментального безопасного зазора, мм; ΔР – расчетное значение максимального избыточного давления взрыва газа, кПа; $S_u$ – расчетное значение нормальной скорости распространения пламени, м/с; $d_{кр}$ – фактическое значение критического диаметра длинного цилиндрического огнегасящего канала, мм; $dp/d\tau_{max}$ – расчетное значение максимальной скорости нарастания давления взрыва водородо-воздушной смеси, кПа/с; $W_{min}$ – расчетное значение минимальной энергии зажигания, Дж; $u_0$ – расчетное значение предельной скорости срыва диффузионного горения, м/с; $\varphi_ф$ – расчетное значение флегматизирующей концентрации огнетушащей смеси в зависимости от выбранного вида огнетушащего вещества в атоматической установке газового пожаротушения, % (об.); $V_{св}$ – свободный объем помещения, м$^3$; $l_к$ – величина критического зазора, м; $V_{всг}$ – объем ВСГ, вышедшего из аппарата, м$^3$; $V_{труб}$ – объем ВСГ, вышедшего из трубопроводов, м$^3$; $m_{всг}$ – масса ВСГ, которая останется в объеме помещения с учетом работы аварийной вентиляции.

*Примечание*: индекс «(доп.)» – безопасное (допустимое) значение критерия.

На основе мультипарадигменного языка программирования «*Python*» сформирован программный код, обеспечивающий упрощение определения параметров и автоматизированную работу критериальной модели [17].

Пользователю достаточно задать исходные (фактические) значения технологических параметров $x_i$, которые вносятся в расчетные формулы и сравниваются с предельными (безопасными) значениями параметров взрывопожарной опасности $x_i^{доп}$.

В случае превышения предельного значения параметра переменной $Q_i^б$ присваивается 1. Однако, в том случае если предельно допустимое значение параметра находится в безопасной области переменной $Q_i^б$ будет равна 0.

В результате суммирования единиц и нулей, полученных при сравнении, технологическому участку присваивается категория уровня взрывопожарной опасности (табл. 5).

По результатам построения критериальной модели была построена принципиальная блок-схема алгоритма оценки уровня взрывопожароопасности технологического оборудования объектов производства и обращения ВСГ (рис. 4).

*Таблица 5 – Категории уровня взрывопожарной опасности и критерии отнесения*

| Категория уровня взрывопожарной опасности | Критерии |
|---|---|
| Высокая | $x_i > 7$ |
| Средняя | $5 < x_i \leq 7$ |
| Умеренная | $3 < x_i \leq 5$ |
| Низкая | $x_i \leq 3$ |

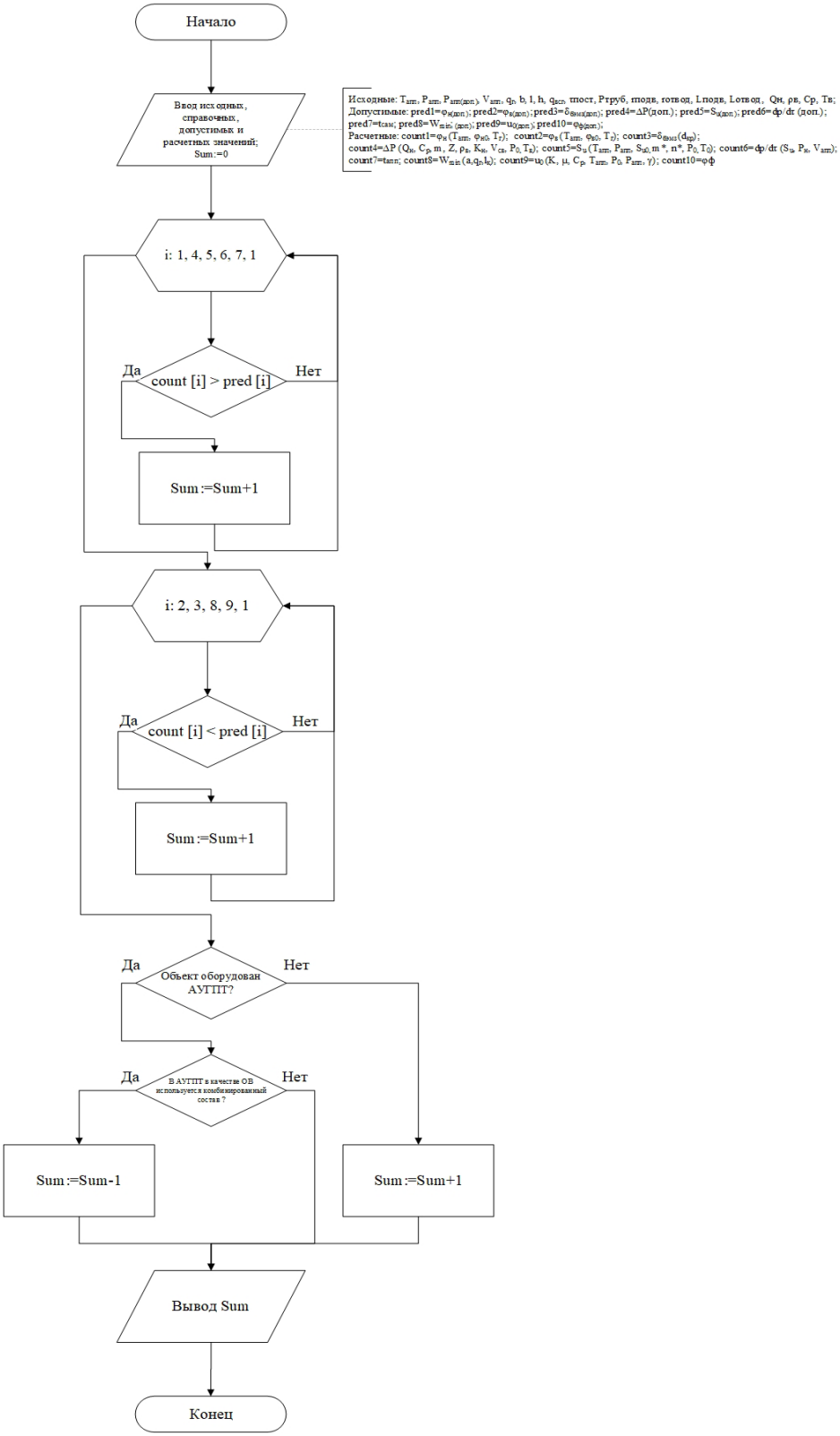



*Рисунок 4 – Принципиальная блок-схема алгоритма оценки уровня взрывопожароопасности технологического оборудования объектов производства и обращения ВСГ*

По результатам апробации на 2 объектах ТЭЦ, использующих водородные системы в качестве охлаждения турбогенераторов, электролизным цехам был присвоен средняя категория уровня взрывопожарной опасности (табл. 6).

*Примечание*: значение избыточного давления взрыва $\Delta P$ в модели рассчитывается по методу определения категорий помещений А и Б СП 12 [7] (формула (3)):

$$\Delta P = (P_{max} - P_0)\frac{m_{\text{пст}} Z}{V_{\text{св}}\rho_{\text{т}}} \cdot \frac{100}{C_{\text{ст}}} \cdot \frac{1}{K_{\text{н}}}. \quad (3)$$

В данном случае с помощью языка *Python* использовался стандартный способ округление значения с точностью до двух знаков после запятой. Однако, в используемом языке существует несколько способов округления чисел с плавающей точкой до определенного количества знаков после запятой. Его выбор зависит от конкретной задачи и предпочтений программиста.

В соответствии с таблицей 5-5 приложения 5 к Руководству по безопасности [5] средние повреждения типовых промышленных зданий с тяжелым металлическим или железобетонным каркасом от избыточного давления, при которых возможно их восстановление, происходят при $\Delta P$ в пределах от 30 до 40 кПа.

Данное руководство содержит специальные научно-технические методы исследования опасностей возникновения, развития и последствий возможных аварий, применяемые контрольными (надзорными) органами, а также персоналом промышленных объектов при планировании работ, идентификации опасностей аварий, оценке риска аварий, установлении степени опасности возможных аварий, а также разработке и корректировке мероприятий по снижению риска аварий.

Однако, стоит принять во внимание таблицу 1.1 известной книги Бесчастнова М.В. [18], в которой показано, что при $\Delta P$>33 кПа будут иметь место тяжелые повреждения здания и оно подлежит сносу. Также в таблице А4 [6] среднее повреждение зданий наступает при избыточном давлении $\Delta P$>28 кПа, соответственно категория в обоих случаях повышается до высокой.

Не до конца изученным остается процесс стратификации паро-водородно-воздушных водородсодержащих газовых смесей.

Изучением механизмов, приводящих к стратификации водорода (всплывающие струи и стратификация), механизмов разрушения стратификации (струи с отрицательной плавучестью, тепловой эффект) с 2001 и по настоящее время занимается Агентство по ядерной энергии Организации экономического сотрудничества и развития [19], НИЦ «Курчатовский институт» [20, 21], Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН и другие [22].

При этом, в последние годы наблюдается существенное развитие в области вычислительной газо- и гидродинамики, называемые *computational fluid dynamics* методами (*CFD*).

Большой вклад в изучение стратификации внесли В.М. Головизнин, А.А. Самарский; В.П. Денисенко, И.А. Кириллов, С.В. Коробцев, И.Л. Николаев; R.W. Schefer, W.G. Houf, T.C. Williams; M.R. Swain, E.S. Grilliot, M.N. Swain.

Очевидно, что при разных режимах вентиляции, расположения вентиляционных отверстий, номинальных расходов воздуха вентиляторов и других параметров, места скопления водорода (до взрывоопасных значений) в производственном помещении всегда будут отличаться, соответственно, предположить качественным методом как будет происходить распространение ВСГ в объеме помещения при утечке невозможно [23].

Для решения данной проблемы была проведена разработка (обоснование) вспомогательного инструмента оптимизации при традиционном проектировании расположения газоанализаторов и приточно-вытяжной вентиляции в помещениях, где обращается ВСГ с учетом сложных реальных процессов (неоднородности среды, диффузии и т.д.), для чего была создана численная модель аварийной утечки в вентилируемом помещении объекта производства и обращения водородсодержащего газа с использованием *CFD*-пакета «Симулятор динамики огня» (*Fire Dynamics Simulator*, или *FDS*, препроцессор *Pyrosim version* 6.7.4). Также создан модельный макет для симулирования аварийной утечки в вентилируемом помещении объекта производства и обращения водородсодержащего газа.

Согласно требованиям безопасности производства ВСГ методом электролиза [24], датчики утечек ВСГ рекомендовано устанавливать над каждым наиболее вероятным источником аварийным утечки (под самым потолком), то есть электролизером или компрессором, но не более 3 м от этого источника по горизонтальной плоскости.

Для отслеживания в объеме сетки изменения концентрации газа под потолком производственного помещения размерами 10×5×5 метров в радиусе 3 метров по горизонтальной плоскости были выставлены автоматические газоанализаторы (рис. 5).

По результатам моделирования аварии были получены значения периода времени от начала аварийной утечки до момента достижения концентрации срабатывания сигнализации от датчиков $\tau_{сигн}$, расположенных под потолком, установлено, что при моделируемом режиме вентиляции наименьшее значение $\tau_{сигн}$ отмечено в точке размещения газоанализатора «*Centr0*» (на 10 секунде). Следовательно, при соблюдении требований нормативных документов наибольшая эффективность срабатывания газоанализатора будет выполнена при его размещении в центре под потолком (рис. 6).

*Таблица 6 – Полученные значения критериев по результатам апробации на объектах ТЭЦ*

| Критерий | Значение | |
|---|---|---|
| | ТЭЦ №1 | ТЭЦ №2 |
| ΔP | 33,21 кПа | 40,72 кПа |
| $\delta_{бэмз}$ | 0,00023 | 0,00023 |
| $\varphi_н$ - $\varphi_в$ | 3,90 – 76,83 | 3,90 – 76,83 |
| $S_u$ | 3,47 | 3,47 |
| $\varphi_ф$ | АУПТ отсутствует | АУПТ отсутствует |
| dp/dτ | 647,49 | 498,79 |
| $W_{min}$ | $3{,}15 \cdot 10^{-6}$ | $3{,}15 \cdot 10^{-6}$ |
| $u_0$ | 10666,4 | 10666,4 |
| Категория | Высокая | Высокая |

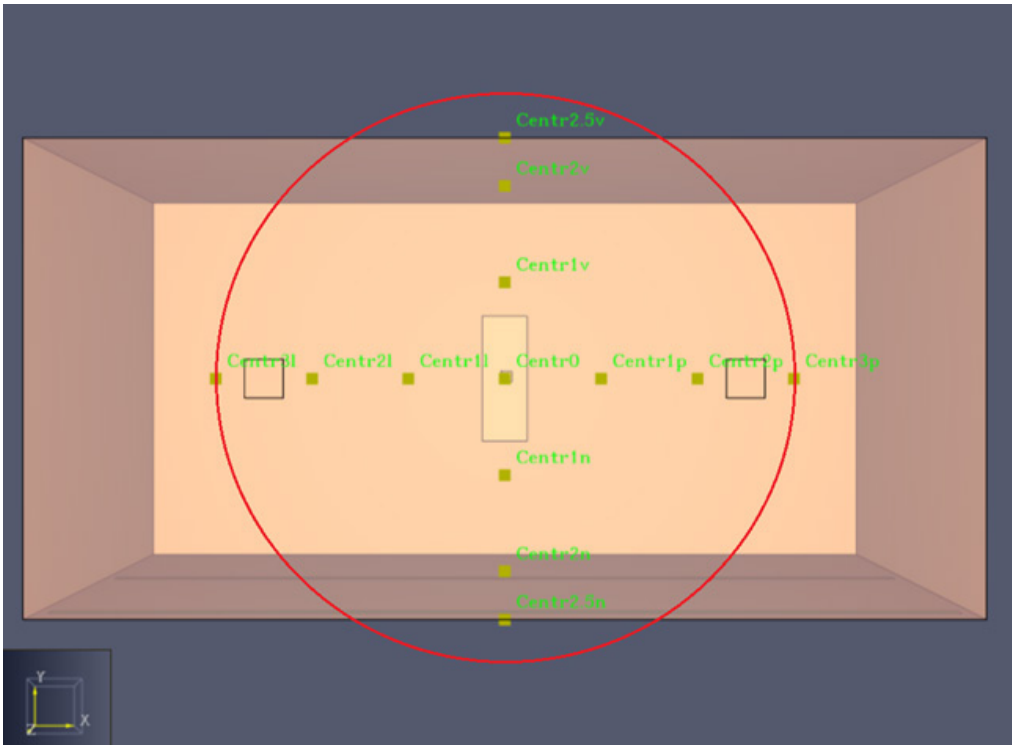



*Рисунок 5 – Размещение автоматических газоанализаторов под потолком помещения электролизной в радиусе 3 метров*

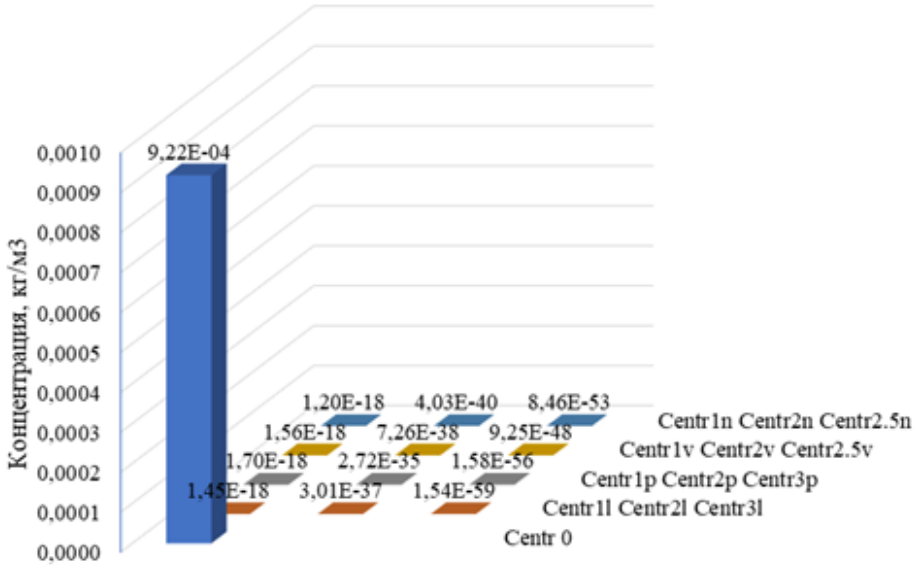



*Рисунок 6 – Концентрационное поле на момент времени аварии на 10 секунде*

Тем не менее, в случае невозможности установки газоанализатора в центре помещения (из-за наличия конструктивных потолочных элементов) на основании моделирумого концентрационного поля установлено, что эффективнее размещать датчик в точке «*Centr1l*» и в точке «*Centr1n*».

Для решения проблем исследования процесса стратификации паро-водородно-воздушных водородсодержащих газовых смесей авторами разработан макет для моделирования аварийной утечки водородсодержащего газа в вентилируемом помещении объекта производства и обращения ВСГ (рис. 7) [25, 26].

Кратность вентиляторов в данной схеме может изменяться с помощью подключенного к ним регулируемого импульсного источника питания (лабораторного блока питания).

Электролизная газовая установка «Лига-02» (1) подключается к источнику электропитания, после чего ручка регулятора тока плавно поворачивается по часовой стрелке до загорания первого светодиодного индикатора. При помощи ротаметра «РМ-А-0.063 ГУЗ» было получено значение расхода газа на выходе при загорании первого светодиодного индикатора (0,063 м$^3$/ч). Размеры корпуса модельного помещения составляют 1х0,5х0,5 м. Материал корпуса – органическое стекло и поливинилхлорид. В корпусе помещения (6) размещены датчик автоматического газоанализатора СИГНАЛ-4М (7), приточный и вытяжной вентиляторы (9). Номинальное значение объемного расхода $L$ воздуха используемых вентиляторов – 9,6 м/с.

Схема макета модельного помещения представлена на рисунке 8.

По полученным экспериментальным данным концентрационных полей построены около 100 графиков зависимости концентрации водородсодержащего газа. На рисунке 9 представлены графики зависимости изменения концентрации по времени при разных вариантах аварии (5 вариантов мест утечек, приточный и вытяжной вентиляторы расположены в потолке, газоанализатор в центре под потолком). При каждом варианте аварии проводилось 3 повторения.

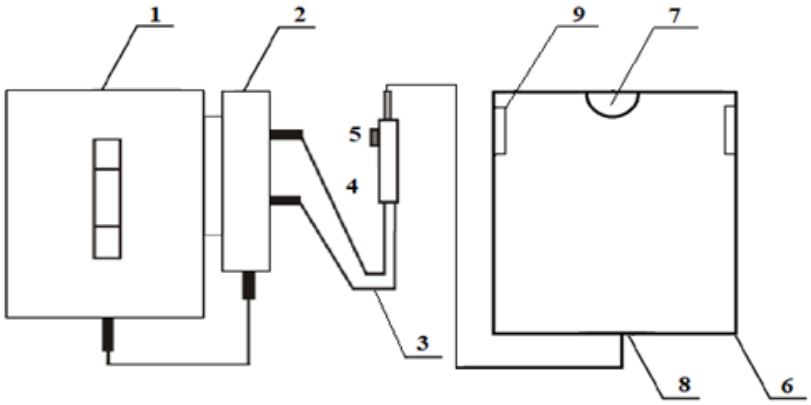



*Рисунок 7 – Схема макета для моделирования аварийной утечки водородсодержащего газа в вентилируемом помещении объекта производства и обращения ВСГ: 1 – блок электролизера; 2 – охладитель-обогатитель; 3 – шланги; 4 – пламегаситель; 5 - регулятор качества газа; 6 – корпус модельного помещения; 7 – датчик автома-тического газоанализатора; 8 - источник утечки газа; 9 – вентиляторы*

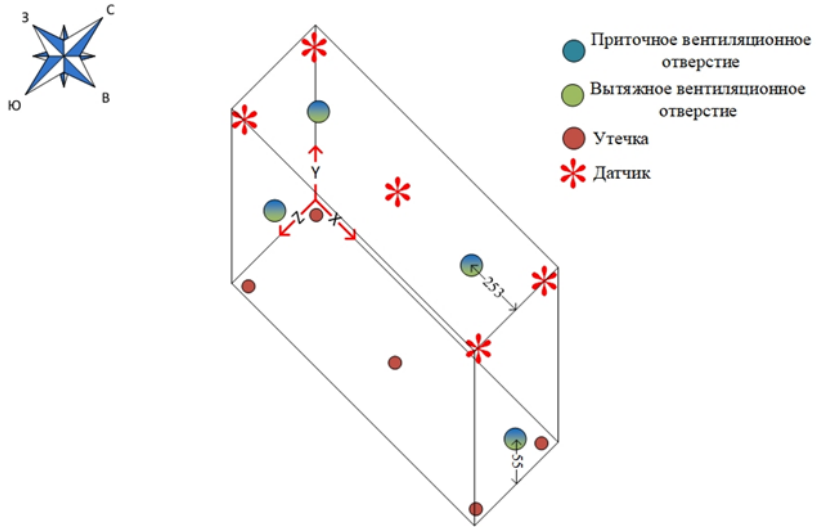



*Рисунок 8 – Схема макета модельного помещения, входящего в состав макета*

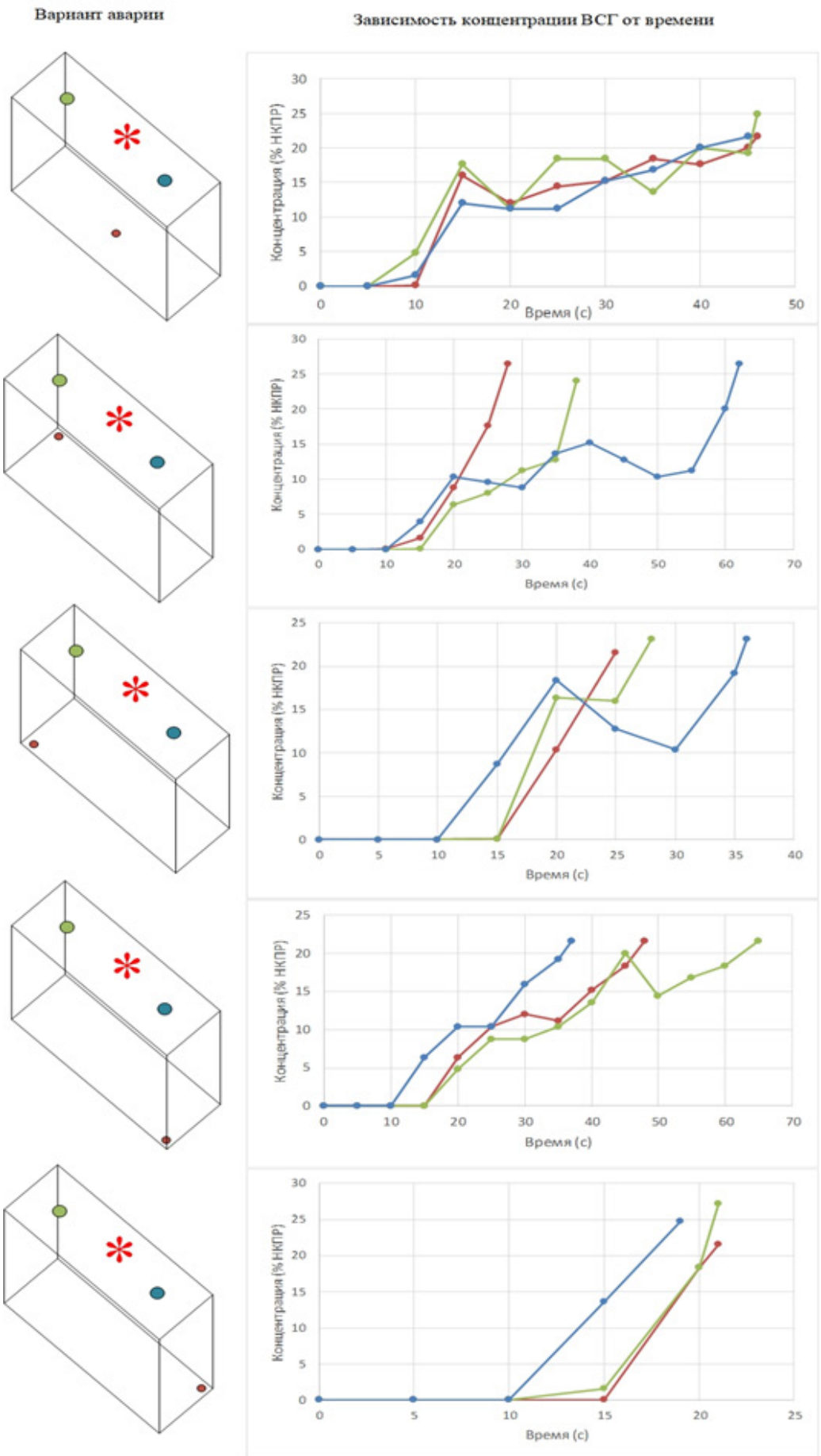



*Рисунок 9 – Варианты моделирования аварий на макете*

На основе базы полученных экспериментальных данных были обобщены значения периода достижения 20% НКПР в различных точках расположения датчика и различных режимах вентиляции в программном коде, заданного на базе высокоуровневого языка программирования *Python*. Данный программный код также создан в качестве вспомогательного инструмента оптимизации при традиционном проектировании расположения газоанализаторов и приточно-вытяжной вентиляции в помещениях, где обращается ВСГ.

**Обсуждение.** Итоговым результатом обоснования метода оценки взрывопожарной опасности объектов производства и обращения ВСГ является алгоритм оценки взрывопожарной опасности объектов производства и обращения водородсодержащего газа, построенный на основе имеющихся вышеперечисленных методик оценки рисков аварий (рис. 10).

В качестве рекомендаций по снижению уровня взрывопожарной опасности на опасном производственном объекте (ОПО) разработана система введения ингибиторов в водородопровод.

Предлагаемая система относится к способу предотвращения воспламенения, взрыва газовоздушных смесей, либо прекращения горения в случае воспламенения газовоздушной смеси при прорыве стенки газотрубопровода в процессе транспортировки газообразного водорода, а именно к системам введение газовых средств тушения пожара в магистраль, по которой поступает горючий газ в определяемый заранее защищенный участок газопровода, расположенного после задвижки, в частности в виде магистрали для транспортирования газообразного углеводорода или водорода (рис. 11).

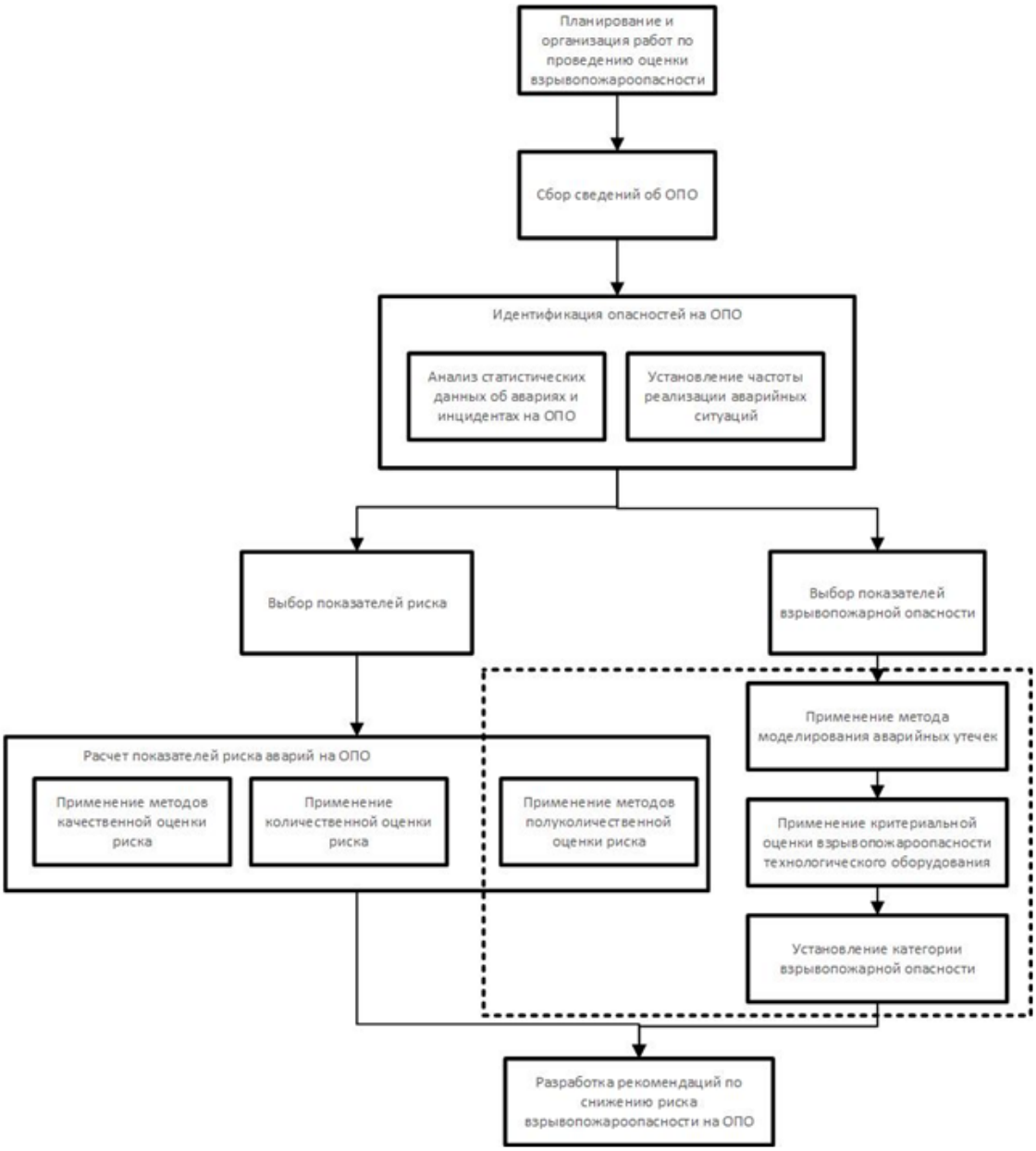



*Рисунок 10 – Алгоритм оценки взрывопожарной опасности объектов производства и обращения водородсодержащего газа*

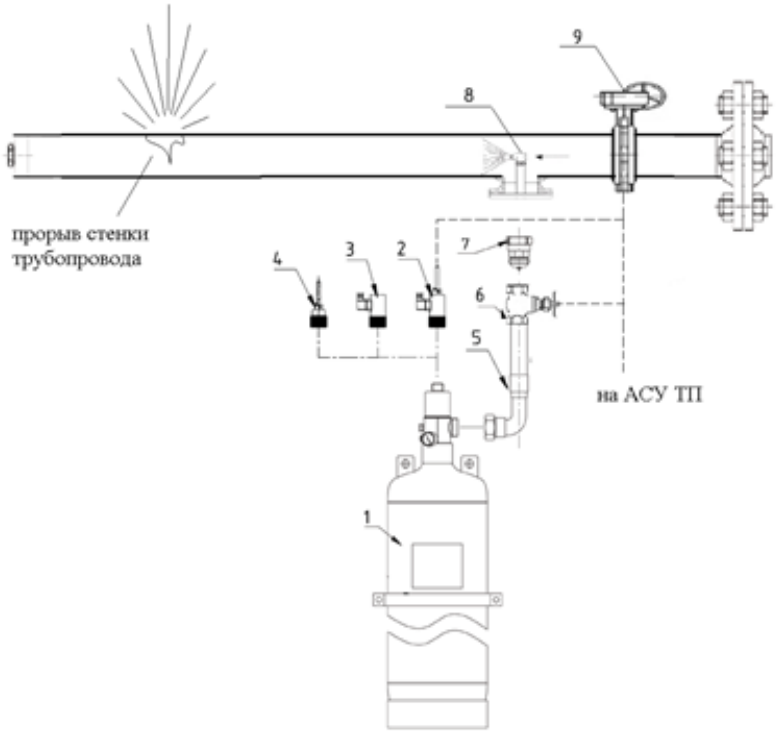



*Рисунок 11 – Система введения ингибитора в водородопровод*
*1 – источник газового средства пожаротушения; 2 – электрическое пусковое устройство, совмещенное с ручным пускателем; 3 – электрическое пусковое устройство, без ручного пускателя; 4 – устройство ручного пуска; 5 – напорный патрубок; 6 – запорный кран; 7 – обратный клапан; 8 – форсунка распылительная; 9 – задвижка с электроприводом*

Сущность разработанного технического решения состоит в использовании форсунок, расположенных перед задвижками и установленных в стенках трубопровода для ввода ингибитора, при этом средства подачи ингибитора размещены, предпочтительно, вне трубопровода.

В качестве ингибиторов предотвращения детонации водородно-воздушных смесей используют инертные газы, такие как азот, углекислый газ и их смеси (составляющие 85% углекислого газа и 15% хладона *114B2* по массе). Также известно использование галогенуглеводородов – производных брома, фтора и хлора насыщенных углеводородов (таких как тетрафтордибромэтан, трифторбромметан, дифторхлорбромметан), действующих как газофазные ингибиторы в аналогичных случаях.

Результаты данных исследований были представлены и обсуждены на ряде научных мероприятий, включая XIV международную научно-практическую конференцию курсантов, студентов, слушателей и адъюнктов в Минске (УГЗ, 2020), международные и всероссийские научно-практические конференции, посвящённые темам безопасности, мониторинга, предотвращения и ликвидации чрезвычайных ситуаций, пожарной безопасности и другим актуальным проблемам. Мероприятия проводились в различных городах, включая Санкт-Петербург, Иваново, Минск и Кокшетау, и охватывали период с 2020 по 2023 год.

**Выводы.** Результаты исследования были отражены в виде общих принципов оценки взрывопожарной опасности объектов производства и обращения ВСГ, а именно:

– методологических и нормативных основ оценки взрывопожарной опасности объектов производства и обращения водородсодержащего газа;

– сведений по частотам реализации аварийных событий в зависимости от типа оборудования объектов, области промышленности и поражающего эффекта на объектах производства и обращения водородсодержащего газа;

– критериальной модель оценки взрывопожарной опасности технологического оборудования объектов производства и обращения водородсодержащего газа;

– численной модель аварийной утечки водородсодержащего газа из технологического оборудования в вентилируемом помещении;

– экспериментальном методе моделирования аварийной утечки в вентилируемом помещении объекта производства и обращения водородсодержащего газа;

– алгоритме оценки взрывопожарной опасности объектов производства и обращения водородсодержащего газа.

– в качестве рекомендаций по снижению уровня взрывопожарной опасности на объекте производства и обращения ВСГ предложена система введения газовых средств тушения пожара в водородопровод.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 5 августа 2021 г. № 2162-р «Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации».

2. Global low carbon hydrogen production capacity to re-

ach 14 mtpa in 2030, forecasts GlobalData. URL: https://www.globaldata.com/media/oil-gas/global-lowcarbon-hydrogenproduction-capacity-reach-14-mtpa-2030-forecasts-globaldata/ (дата обращения: 03.05.2024).

3. Обеспечение водородной безопасности на атомных электростанциях с водоохлаждаемыми реакторными установками. Современное состояние проблемы / И.А. Кириллов, Н.Л. Харитонова, Р Б. Шарафутдинов, Н.Н. Хренников // Ядерная и радиационная безопасность. – 2017. – № 2(84). – С. 26-37.

4. Григорьев, С.Ю. Моделирование процессов конвективного перемешивания и пристеночного массообмена в задачах анализа водородной безопасности АЭС при тяжелой аварии : специальность 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Григорьев Сергей Юрьевич. – Москва, 2017. – 22 с.

5. Приказ Ростехнадзора от 03.11.2022 № 387 «Об утверждении Руководства по безопасности «Методические основы анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах».

6. ГОСТ Р 12.3.047-2012. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля.

7. Федеральный закон «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» от 22.07.2008 № 123-ФЗ (последняя редакция).

8. СП 12.13130.2009. Свод правил. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.

9. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). Издание седьмое.

10. РД 34.03.350-98 «Перечень помещений и зданий энергетических объектов РАО «ЕЭС России» с указанием категорий по взрывопожарной и пожарной опасности».

11. European Commission, Joint Research Centre (JRC) (2023): HIAD 2.1. European Commission, Joint Research Centre (JRC) // Joint Research Centre Data Catalogue URL: https://data.jrc.ec.europa.eu/dataset/1d6b06e9-3a89-4ec2-b051-3fb8a28eab9f (дата обращения: 03.05.2024).

12. Wen, Jennifer & Marono, Marta & Moretto, Pietro & Reinecke, Ernst-Arndt & Sathiah, Pratap & Studer, Etienne & Vyazmina, Elena & Melideo, Daniele. (2022). Statistics, lessons learned and recommendations from analysis of HIAD 2.0 database. International Journal of Hydrogen Energy. 47. 10.1016/j.ijhydene.2022.03.170.

13. Тимошенко, А.Л. Анализ зарубежных нормативных документов, регулирующих пожарную и промышленную безопасность водородных топливных элементов / А.Л. Тимошенко, Г.Х. Самигуллин // Пожарная безопасность: современные вызовы. Проблемы и пути решения: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 26 апреля 2022 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий имени Героя Российской Федерации генерала армии Е.Н. Зиничева, 2022. – С. 178-180.

14. Етумян Артур Саркисович, Новикова Алевтина Васильевна, Григорьева Елена Михайловна, Сафонова-Шишкова Нина Валериевна / Развитие стандартизации и нормирования в области пожарной безопасности в системе государственного управления // Актуальные вопросы пожарной безопасности. 2021. №4 (10). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-standartizatsii-i-normirovaniya-v-oblasti-pozharnoy-bezopasnosti-v-sisteme-gosudarstvennogo-upravleniya (дата обращения: 03.05.2024).

15. Тимошенко, А.Л. Критериальная модель оценки уровня пожарной опасности технологического оборудования водородной энергетики / А.Л. Тимошенко, Г.Х. Самигуллин // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2023. – № 3(67). – С. 96-105. – DOI 10.61260/1998-8990-2023-3-96-105.

16. Тимошенко, А.Л. Показатели, необходимые для оценки пожарной опасности водородсодержащего газа / А.Л. Тимошенко, Г.Х. Самигуллин, Е.Б. Алексеик // Пожарная безопасность: современные вызовы. Проблемы и пути решения: Материалы Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 27 апреля 2023 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий имени Героя Российской Федерации генерала армии Е.Н. Зиничева, 2023. – С. 112-115.

17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023663736 Российская Федерация. Расчет пожарного риска технологического участка объекта водородной энергетики: № 2023661668: заявл. 06.06.2023: опубл. 27.06.2023 / Д.В. Медведев, Г.Х. Самигуллин, А.Л. Тимошенко; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий имени Героя Российской Федерации генерала армии Е.Н. Зиничева».

18. Бесчастнов М.В. Промышленные взрывы. Оценка и предупреждение. – М.: Химия, 1991. – 430 с.

19. Paladino, Domenico & Kapulla, Ralf & Paranjape, Sidharth & Suter, Simon & Andreani, Michele. (2022). PANDA experiments within the OECD/NEA HYMERES-2 project on containment hydrogen distribution, thermal radiation and suppression pool phenomena. Nuclear Engineering and Design. 392. 111777. 10.1016/j.nucengdes.2022.111777.

20. Korobtsev S., Denisenko V., Kirillov I., Nikolaev I. Hydrogen-air explosive envelope behavior in confined space at different leak velocities. 3rd International Conference on Hydrogen Safety, Ajaccio, France, Sept. 16-18, 2009.

21. Denisenko V.P., Kirillov I.A., Korobtsev S.V. at al. «Hydrogen Subsonic upward Release and Dispersion Experiments in Closed Cylindrical Vessel», 2th INTERNATIONAL CONFERENCE ON HYDROGEN SAFETY, SAN SEBASTIAN, SPAIN, September 11-13, 2007. – P. 106.

22. Schefer, R.W., Houf, W.G., Williams, T.C., Investigation of Small-Scale Unintended Releases of Hydrogen: Buoyancy Effects Int. Jour. of Hydrogen Energy, Vol. 33, 4702-4712, September 2008.

23. Swain, Michael & Grilliot, Eric & Swain, Matthew. (1999). Experimental verification of a hydrogen risk assessment method. Chemical Health and Safety. 6. 10.1016/S1074-9098(00)80037-4.

24. Постановление Госгортехнадзора РФ от 06.06.2003 № 75 «Об утверждении Правил безопасности при производстве водорода методом электролиза воды» (Зарегистрировано в Минюсте РФ 19.06.2003 № 4780).

25. Самигуллин Г.Х., Тимошенко А.Л., Сташков Р.С., Королев А.А. Применение лабораторного электролизера для исследования инерционности газоанализатора, установленного в модельном производственном помещении // Сборник материалов XI Международного научного семинара-конференции «Пожарная безопасность в условиях современности». – Кокшетау: ГУ «Академия гражданской защиты имени Малика Габдуллина МЧС Республики Казахстан». – 2023. – С. 100-102.

26. Ребезов С.А. Метод определения оптимальной высоты газоанализатора при малых утечках водородосодержащего газа / С.А. Ребезов, А.Л. Тимошенко // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). – 2024. – № 1(49). – С. 6-15. – DOI 10.61260/2307-7476-2024-1-6-15.

*Статья поступила в редакцию 06.05.2024*
*Статья принята к публикации 17.06.2024*

УДК 622.807, 622.81
EDN: FOIDFN

# ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СНИЖЕНИЯ ЗАПЫЛЕННОСТИ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

© Автор(ы) 2024

SPIN: 5251-635
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 императрицы Екатерины II*
*(199106, Россия, Санкт-Петербург, 21 линия, д. 2, e-mail: korshunov_gi@pers.spmi.ru)*
ScopusID: 57828607800

**СПИЦЫН Андрей Александрович**, аспирант кафедры безопасности производств
*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II*
*(199106, Россия, Санкт-Петербург, 21 линия, д. 2, e-mail: s215069@stud.spmi.ru)*
ORCID: 0000-0003-4792-2398
ResearcherID: A-0000-0000
ScopusID: 58043320100

**ОНЕГОВ Никита Андреевич**, магистр
*Уфимский государственный нефтяной технический университет*
*(450062, Россия, Уфа, ул. Космонавтов, д. 1, e-mail: n.a.onegov@gmail.com)*

**ФИТЕРМАН Софья Игоревна**, магистр
*Уфимский государственный нефтяной технический университет*
*(450062, Россия, Уфа, ул. Космонавтов, д. 1,e-mail: fitermansss@mail.ru)*

**Аннотация.** Одной из основных опасностей на угольных шахтах, как с точки зрения развития профессиональных заболеваний, так и с точки зрения вероятности поражения работников в результате взрыва, является повышенный уровень запыленности. С учетом того, что объемы добычи угля подземным способом растут, вопросы охраны труда требуют повышенного внимания. Согласно статистическим данным, заболевания органов дыхания, обусловленные воздействием аэрозолей, являются наиболее распространенными среди подземного персонала угольных шахт. Также, взрывы пылеметановоздушных смесей приводят к многочисленным жертвам среди работников угольных шахт. В данной статье рассматриваются основные методы, направленные на снижение уровня запыленности и предупреждение взрывов пылегазовоздушных смесей, предлагается разработанная методика пылеподавления. В рамках исследования приводятся статистические данные по производственному травматизму, а также состав разработанного средства снижения запыленности и пылевзрывозащиты на основе гидрогеля. Приводятся расчетные формулы для определения ключевых параметров разработанной смеси, описываются ее основные достоинства и проводится сопоставление результатов исследования с существующими методиками пылеподавления, приведено обоснование целесообразности использования разработанного состава.

**Ключевые слова:** угольная пыль, аэрозоль, пылеметановоздушная смесь, угольные шахты, пылеподавление, травматизм, профессиональные заболевания.

# APPLICATION OF THE METHOD OF REDUCING DUST IN COAL MINES

© The Author(s) 2024

**KORSHUNOV Gennady Ivanovich**, doctor of technical sciences,
professor of the Department of Industrial Safety
*Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University*
*(199106, Russia, Saint-Petersburg, 21 line, 2, e-mail: korshunov_gi@pers.spmi.ru)*

**SPITSYN Andrey Alexandrovich**, postgraduate student Department of Industrial Safety
*Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University*
*(199106, Russia, St. Petersburg, 21 line, 2, e-mail: s215069@stud.spmi.ru)*

**ONEGOV Nikita Andreevich**, master's degree
*Ufa State Petroleum Technical University*
*(450062, Russia, Ufa, Kosmonavtov str., 1, e-mail: n.a.onegov@gmail.com)*

**FITERMAN Sofya Igorevna**, master's degree
*Ufa State Petroleum Technical University*
*(450062, Russia, Ufa, Kosmonavtov str., 1, e-mail: fitermansss@mail.ru)*

**Abstract.** One of the main hazards in coal mines, both from the point of view of the development of occupational

diseases and from the point of view of the likelihood of injury to workers as a result of an explosion, is an increased level of dust. Taking into account the fact that the volume of underground coal mining is growing, occupational safety issues require increased attention. According to statistics, respiratory diseases caused by exposure to aerosols are the most common among underground coal mine personnel. Also, explosions of dust-methane-air mixtures lead to numerous casualties among coal mine workers. This article discusses the main methods aimed at reducing the level of dust and preventing explosions of dust and gas-air mixtures, and proposes a developed dust suppression technique. The study provides statistical data on occupational injuries, as well as the composition of the developed means of reducing dust and dust and explosion protection based on hydrogel. Calculation formulas for determining the key parameters of the developed mixture are given, its main advantages are described and the results of the study are compared with existing dust suppression techniques, and the rationale for using the developed composition is given.

**Keywords:** coal dust, aerosol, dust-methane-air mixture, coal mines, dust suppression, injuries, occupational diseases.

***Для цитирования:*** *Коршунов Г.И. Применение метода снижения запыленности в угольных шахтах / Г.И. Коршунов, А.А. Спицын, Н.А. Онегов, С.И. Фитерман // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 2(66). – С. 250-255. – EDN: FOIDFN.*

**Введение.** Горная отрасль занимает одно из ведущих мест в структуре отечественной экономики, являясь важнейшим источником доходов государства. Большие запасы и устойчивая тенденция к увеличению объемов добычи угля подземным способом являются залогом того, что данная отрасль в обозримой перспективе сохранит ключевое место в экономике страны [1-3].

Вместе с тем, ведение работ по добыче угля подземным способом сопровождается достаточно большим количеством легких, тяжелых и смертельных несчастных случаев. Как правило, смертельные несчастные случаи приурочены к таким технологическим операциям как добычные и вскрышные работы [4-6].

К основным причинам производственного травматизма на объектах отрасли можно отнести:

– взрывы метана и пыли;
– эксплуатация транспорта, машин и механизмов;
– обрушение горных пород;
– падение с высоты;
– горные удары и др. [7-9].

Кроме того, весомый вклад в количество несчастных случаев вносит и низкое качество подготовки работающего персонала, что приводит к нарушению производственных и должностных инструкций и, как следствие, нарушению технологии производства и требований охраны труда на предприятии [10-12].

Ключевым показателем, отражающим опасность того или иного вида деятельности для человека является индивидуальный риск. Его величина отличается для различных производственных процессов, характеризуя степень их опасности [5, 7, 13].

С учетом известного количества смертельных несчастных случаев и среднесписочного числа работающего персонала, возможно определить величину индивидуального риска смертельного травматизма для работника горной отрасли по формуле 1:

$$R_{инд}=Q/H_{сс} \quad (1)$$

где $R_{инд}$ – индивидуальный риск, год$^{-1}$;

$Q$ – количество смертельных несчастных случаев на угольных шахтах за рассматриваемый календарный год;

$H_{сс}$ – среднесписочное количество работников угольных шахт за рассматриваемый календарный год, чел. [7, 9].

В соответствии с данными Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзора), за период с 2018 по 2022 года риск смертельного травматизма на угольных шахтах России изменялся следующим образом (рис. 1).

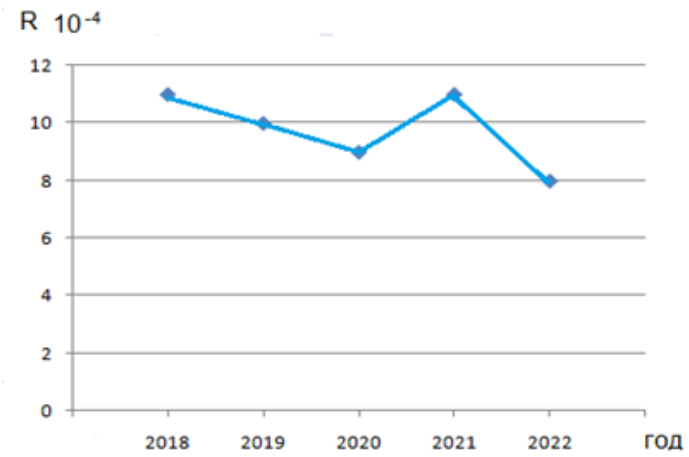



*Рисунок 1 – Динамика риска смертельного травматизма на угольных шахтах России 2018-2022 гг. [7, 9]*

Ключевым фактором, приводящим к случаям смертельного травматизма, являются взрывы метана и пыли. Угольная пыль способна к самовоспламенению, способна стать причиной пожара и взрыва. Частицы пыли за счет своей незначительной крупности и, как следствие, легкости, способны переноситься на значительные расстояния [7, 9, 14].

Вдыхание респирабельной фракции угольной пыли в долгосрочной перспективе приводит к развитию профессиональных заболеваний дыхательных путей работников, таких как силикозы и пневмокониозы. Кроме этого, воздействия пыли может приводить к заболеваниям кожного покрова и слизистой оболочки глаз. Также, за счет высоких абразивных свойств угольная пыль может приводить к повышенному износу оборудования [14-16].

Для снижения негативного воздействия на организм человека аэрозолей преимущественно фиброгенного действия (АПФД) применяются различные организационные и технические мероприятия, такие как осланцевание, применение заслонов от инертной пыли, сокращение времени работы в условиях повышенной запыленности, применение средств индивидуальной защиты органов дыхания (фильтрующие полумаски – респираторы) [8, 11, 17].

При использовании фильтрующих полумасок важнейшим условием является их гипоаллергенность – материал не должен вызывать раздражение кожи. Респиратор состоит из наружного слоя, предназначенного для фильтрации частиц с высокой крупностью, основного слоя, обеспечивающего защиту от респирабельной фракции пыли, и внутреннего слоя, выполняющего гигиеническую функцию. Также, крайне важна способность респиратора сохранять фильтрующие свойства без создания сопротивления дыханию работника. В случае, если фильтрующая маска забивается пылью, создается сопротивление дыханию, вследствие чего работник может снять респиратор, пренебрегая техникой безопасности [8, 15, 18].

В данной статье приводится обоснование целесообразности применения раствора на основе гидрогеля в целях снижения уровня запыленности и предупреждения взрывов пылеметановоздушных смесей на угольных шахтах.

**Методология.** В силу большого количества тяжело и смертельно травмированных работников из числа подземного персонала угольных шахт при взрывах пылеметановоздушных смесей, важнейшее значение имеет проведение мероприятий, направленных на их предотвращение [19-21].

Наиболее распространенным методом предотвращения взрывов является осланцевание. Под осланцеванием понимают покрытие бортов и кровли горной выработки инертной пылью. Как правило, в качестве инертной используется сланцевая пыль. Данный вид пыли не обладает горючими свойствами, вследствие чего снижает температуру среды в процессе горения и взрыва пылеметановоздушной смеси. При этом, концентрация взрывоопасной угольной пыли снижается до невзрывоопасной. Такой метод получил наибольшее распространение на угольных шахтах страны в силу своей дешевизны и изученности [19, 20, 22].

Для проведения работ данного типа используются осланцеватели. Данное оборудование позволяет повысить интенсивность работ и снизить нагрузку на подземный персонал (рис. 2).



*Рисунок 2 – Осланцеватели типа SMYK (Польша) [8, 9]*

Выделяют следующие группы осланцевателей:
– монорельсовые;
– колесные;
– стационарные [17, 18].

Осланцеватель состоит из металлической емкости, в которую засыпается сланцевая пыль, вентилятора, создающего воздушный поток разносящий пыль по горной выработке, шнека, воздушной турбины и смесительной камеры. Некоторые осланцеватели оснащаются специальными рукавами для увеличения расстояния на которую подается пыль [17, 18, 23].

Контроль качества осланцевания может производиться оценкой содержания пыли в пробе экспресс-методом, при помощи визуального осмотра, определением содержания негорючих веществ в пыли смешанного состава [11, 13, 18].

Вместе с тем, применение осланцевания может привести к созданию еще большей запыленности в горной выработке и превышениям установленных ПДК. Также, при высоких концентрациях пыль слеживается и, при этом, теряются ее гидрофобные свойства. Оценка качества проведенного мероприятия также требует качественной лабораторной базы и организации строгой периодичности работ по осланцеванию горной выработки [11, 13, 24].

Другим распространенным способом снижения запыленности на угольных шахтах является обработка бортов горной выработки водой, способствующей связыванию осевшей пыли. Также, данный метод способствует коагуляции пылевых частиц и, как следствие, их скорейшему оседанию и предотвращению перехода во взвешенное состояние. Однако, данный метод обладает меньшей

эффективностью по отношению к осланцеванию и сопровождается высоким расходом воды и затратами на прокладку коммуникаций [24, 25].

В целях повышения эффективности пылеподавления и исключение перечисленных недостатков существующих методов обеспыливания в качестве альтернативы предлагается использовать раствор на основе гидрогеля.

Преимуществом данного состава является его устойчивость, прочность, высокая абсорбционная способность и экологическая безопасность. В основе гидрогеля лежит полимерное соединение, а сам состав представляет собой гранулированный порошок разбавленный водой. Применение гидрогеля способствует снижению запыленности посредством увлажнения бортов и кровли выработки. Взрывоопасные пылевые частицы удерживаются в вязком слое в результате чего их переход во взвешенное состояние становится невозможным. В условиях повышенной влажности происходит слипание мелкодисперстных частиц между собой и, как следствие, их укрупнение. При этом, удельная поверхность частиц уменьшается, а их реакционная способность снижается. Результатом применения данных составов является предотвращение взрывов пылеметановоздушных смесей, а также снижение уровня запыленности в горной выработке [25-27].

В качестве сорбента предлагается использовать отечественный состав «Аквасин-П». Сухой концентрат, лежащий в основе данного состава, является экологически безопасным и не представляет угрозы для здоровья человека. Были проведены исследования текучести гидрогеля при его концентрации от 2 до 16% на материалах, моделирующих поверхности горных выработок (брус и монолитный кусок угля) [27].

Согласно паспорту безопасности химической продукции (РПБ № 74584703.20.62166) сорбент «Аквасин-П» включает в себя полипроп-2-еноат натрия, хлорид натрия и хлорид аммония. Полипроп-2-еноат натрия относится к четвертому классу опасности вещества (малоопасные), хлориды натрия и аммония к третьему (умеренно опасные). При этом, состав наносится в разбавленном состоянии, что также способствует снижению негативного воздействия данных веществ на работников предприятия и окружающую среду.

ПДК компонент состава представлены в таблице 1.

Необходимо отметить, что новизна данного исследования заключается в применении раствора на основе гидрогеля непосредственно на угольных шахтах в целях пылевзрывозащиты и снижения негативного воздействия пыли на работающий персонал.

Для определения периодичности нанесения гидрогеля необходимо знать скорость, с которой происходит снижение содержания воды в нем. В соответствии с приказом Ростехнадзора №743 влажность угольной пыли должна превышать 12%, так как в противном случае она станет взрывоопасной [27, 28].

Наносимый на поверхность гидрогель с течением времени теряет влагу, становясь более сухим. При увлажнении данный раствор, состоящий из воды и гидрогеля, не теряет своих адгезионных свойств и продолжает улавливать пыль. В целях установления периодичности нанесения гидрогеля необходимо определить интенсивность оседания пыли, вычисляемой по формуле 2:

$$I=((Q_1-Q_2)/(g_2-g_1)Kt)\cdot c \quad (2)$$

где $I$ – интенсивность оседания пыли, (г/м$^3$)·сут;

$Q_1$, $Q_2$ – концентрация пыли в воздухе рабочей зоны на начальном и конечном участке выработки, г/м$^3$;

$g_1$, $g_2$ – длина кровли горной выработки от ее сопряжения до конвейерного штрека и вентиляционной выработки, м;

$K$ – площадь поперечного сечения рассматриваемой подземной горной выработки, м$^2$;

$t$ – продолжительность проводимых измерений в рассматриваемой горной выработке, сут;

$c$ – количество воздуха, проходящего сквозь поперечное сечение подземной горной выработки, м$^3$ [23, 27].

При проведении экспериментальных исследований были взяты следующие параметры, представленные в таблице 2.

*Таблица 1 – ПДК компонент сорбента «Аквасин-П» [составлено авторами]*

| Вещество | ПДК$_{атм.в.}$ (мг/м$^3$) | Класс опасности вещества |
|---|---|---|
| Полипроп-2-еноат | 0,1 | 4 |
| Натрий хлорид | 0,5 | 3 |
| Аммоний хлорид | 0,2 | 3 |

*Таблица 2 – Значения основных параметров при проведении эксперимента [составлено авторами]*

| № | Параметр | Значение |
|---|---|---|
| 1 | Площадь поверхности участка выработки | 2,5 м$^2$ |
| 2 | Площадь сечения выработки | 19,6 м$^2$ |
| 3 | Протяженность участка выработки | 20 м |
| 4 | Интенсивность пылеотложения | 41,6 г/м$^3$·сут |
| 5 | Расход гидрогеля | 2 л/м$^2$ |

**Результаты.** Проведенные экспериментальные исследования позволили установить, что составы с концентрацией гидрогеля от 2 до 3% обладают слабыми адгезионными свойствами и не закрепляются на поверхности выработки.

Составы, содержащие гидрогель с концентрацией от 8 до 16%, сложны в изготовлении, а также плохо закрепляются на поверхности. Составы с данной концентрацией с трудом наносятся на поверхность и в силу неравномерного распределения слоя.

Проведенные исследования позволили установить что наиболее лучшими с точки зрения текучести и способности удержанию пыли обладают составы с содержанием гидрогеля от 4 до 6%. С экономической точки зрения наиболее целесообразно использование составов с 4%-ым содержанием гидрогеля.

Результаты экспериментов с составами, содержащими в себе 4% гидрогеля, представлены в таблице 3.

В целях определения эффективности удерживания частиц пыли данным раствором, проводились замеры концентрации пылевых частиц до и после нанесения гидрогеля в трех участках горной выработки. Первый участок (№1) находился на сопряжении лавы и конвейерного штрека. Второй и третий участки располагались в лаве (№2 и №3).

Результаты замеров концентраций пыли до и после применения рассматриваемого состава представлены в таблице 4.

*Таблица 3 – Результаты экспериментальных исследований [составлено авторами]*

| Концентрация гидрогеля, % | Интенсивность пылеотложения, г/м$^3$·сут | Время удержания, сут |
|---|---|---|
| 4 | 19,9 | 3 |
| 12 | 41,6 | 2 |
| 16 | 57,1 | 1,5 |

*Таблица 4 – Результаты измерения концентрации пыли на участках горной выработки [составлено авторами]*

| Участок выработки | Концентрация пыли до нанесения состава, мг/м$^3$ | Концентрация пыли после нанесения состава, мг/м$^3$ |
|---|---|---|
| №1 | 85 | 22 |
| №2 | 101,4 | 27 |
| №3 | 104,5 | 27,9 |

**Обсуждение.** Наиболее распространенными средствами пылевзрывозащиты на угольных шахтах являются осланцевание и обмывка бортов горной выработки водой. Выбор средств и технологии обеспыливания обусловлен рядом факторов, таких как температура, влажность, устойчивость пород и т.д.

Проведенные экспериментальные исследования позволяют снизить недостатки наиболее распространенных методов пылеподавления за счет использования предлагаемого способа с применением состава на основе гидрогеля. Предложенный метод позволяет существенно снизить выделение пыли массивом горных пород. При этом, очевидны преимущества предлагаемого состава: безопасность для работающего персонала и высокая эффективность.

Кроме того, важнейшим преимуществом состава на основе гидрогеля является его высокая адгезионная способность. Удерживаемая пыль эффективно удерживается данным составом, хорошо сцепляется с поверхностью. Наносить состав предлагается на стены выработки, далее обрабатывать их дистиллированной водой. При этом, влажность гидрогеля снижается до 12%. Рассматриваемый состав способен многократно сохнуть и принимать желеобразную форму, что является важнейшей составляющей с точки зрения его экономической эффективности.

Применение состава позволяет значительно снизить уровень запыленности в горной выработке, что было подтверждено натурными измерениями. Таким образом, раствор на основе гидрогеля позволяет обеспечить снижение концентрации пыли и предотвратить взрыв угольной пыли.

**Выводы.** В ходе выполнения данной научной работы были рассмотрены основные пылеподавляющие составы, применяемые на угольных шахтах. Предложено использование раствора состава гидрогеля в целях предотвращения взрыва угольной пыли и снижения ее концентрации. Проведена экспериментальная апробация состава для одной из угольных шахт. Предложенный состав показал свою эффективность с точки зрения пылеулавливания. Также, проведены экспериментальные исследования в целях определения оптимальной концентрации гидрогеля (4%).

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Глебова Е.В., Волохина А.Т., Вихров А.Е. Оценка эффективности управления культурой производственной безопасности в компаниях ТЭК // Записки Горного института. – 2023. – Т. 259. – С. 68-78. DOI: 10.31897/PMI.2023.12.

2. Gridina E.B., Kovshov S.V., Borovikov D.O. Hazard mapping as a fundamental element of OSH management systems currently used in the mining sector // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2022. – № 1. – С. 107-115. DOI: 10.33271/ nvngu/2022-1/107.

3. Zhang L., Ponomarenko T. Directions for sustainable development of China's coal industry in the post-epidemic era // Sustainability. 2023, vol. 15. – P. 6518-6518. DOI: 10.3390/ su15086518.

4. Tsiglianu P., Romasheva N., Nenko A. Conceptual management framework for oil and gas engineering project implementation // Resources. 2023, vol. 12, no. 6, article 64. DOI: 10.3390/ resources12060064.

5. Ермолаев А.М., Кобылянский М.Т. Анализ и пути снижения смертельного травматизма в угольной промышленности // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. – 2017. – № 2. – С. 91-100.

6. Фомин А.И. Анализ условий и охраны труда на предприятиях угольной отрасли Кузбасса // Вестник Научного

центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. – 2020. – № 3. – С. 57-61. – DOI: 10.25558/VOSTNII.2020.53.88.007.

7. Гридина Е.Б., Боровиков Д.О. Выявление причин травматизма на основе карт оценки профессиональных рисков на угольном разрезе // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6-1. – С. 114-128. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_ 0_114.

8. Коршунов Г.И., Каримов А.М., Магомедов Г.С., Тюлькин С.А. Снижение аэротехногенного воздействия респирабельной фракции пыли на персонал карьера при проведении массовых взрывов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 7. – С. 132-144. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_7_0_132.

9. Иванов Ю.М., Куракина Н.В., Фомин А.И., Ли Хи Ун, Ворошилов А.С. Анализ травматизма работников, обусловленного трудовым стажем. Оценка рисков травматизма // Уголь. – 2022. – № 2. – С. 37-40. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-2-37-40.

10. Мохначук И.И., Пиктушанская Т.Е., Брылева М.С., Бетц К.В. Смертность на рабочем месте на предприятиях угольной промышленности России // Медицина труда и промышленная экология. – 2023. – № 63(2). – С. 88-93. DOI: 10.31089/1026-9428- 2023-63-2-88-93.

11. Kabanov E.I., Korshunov G.I., Magomet R.D. Quantitative risk assessment of miners injury during explosions of methane-dust-air mixtures in underground workings // Journal of Applied Science and Engineering. 2020, vol. 24, no. 1. – P. 105-110. DOI: 10.6180/jase. 202102_24(1).0014.

12. Коробейникова Е.А., Панарина А.В., Куксова К.Д., Пудовкина А.А. Взрыв на шахте «Листвяжная»: рассуждения и выводы / Наука России – будущее страны: Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции. – Пенза: Наука и Просвещение, 2022. – С. 230-235.

13. Литвинов А.Р., Коликов К.С., Ишхнели О.Г. Аварийность и травматизм на предприятиях угольной промышленности в 2010-2015 годах // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2017. – № 2. – С. 6-17.

14. Peters S., de Klerk N., Reid A., Fritschi L., Musk A.B., Vermeulen R. Quantitative levels of diesel exhaust exposure and the health impact in the contemporary Australian mining industry // Occupational and Environmental Medicine. 2017, vol. 74, no. 4. – P. 282-289. DOI: 10.1136/oemed-2016-103808.

15. Saarikoski S., Teinilä K., Timonen H., Aurela M., Laaksovirta T., Reyes F., Vasques Y., Oyola P., Artaxo P., Pennanen S., Junttila S., Linnainmaa M., Salonen R.O., Hillamo R. Particulate matter characteristics, dynamics and sources in an underground mine // Aerosol Science and Technology. 2018, vol. 52, no. 1. – P. 114-122. DOI: 10.1080/02786826.2017.1384788.

16. Eremeeva A.M., Kondrasheva N.K., Khasanov A.F., Oleynik I.L. Environmentally friendly diesel fuel obtained from vegetable raw materials and hydrocarbon crude // Energies. 2023, vol. 16, no. 5, article 2121. DOI: 10.3390/en16052121.

17. Кондрашева Н.К., Еремеева А.М. Получение биодизельного топлива из растительного сырья // Записки Горного института. – 2023. – Т. 260. – С. 248-256. DOI: 10.31897/PMI.2022.15.

18. Balovtsev S.V. Higher rank aerological risks in coal mines // Mining Science and Technology (Russia). 2022, vol. 7, no. 4. – P. 310-319. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-08-18.

19. Баловцев С. В., Скопинцева О. В., Куликова Е. Ю. Иерархическая структура аэрологических рисков в угольных шахтах // Устойчивое развитие горных территорий. – 2022. – Т. 14. – № 2. – С. 276–285. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-276-285.

20. Vasilenko T.A., Islamov A., Doroshkevich A.S., Ludzik K., Chudoba D., Kirillov A., Mita C. Permeability of a coal seam with respect to fractal features of pore space of fossil coals // Fuel. 2022, vol. 329, article 125113. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.125113.

21. Martirosyan A.V., Ilyushin Yu.V. The development of the toxic and flammable gases concentration monitoring system for coalmines // Energies. 2022, vol. 15, no. 23, article 8917. DOI: 10.3390/en15238917.

22. Алабьев В.Р., Новиков В.В., Пашинян Л.А., Бажина Т.П. Нормализация теплового режима протяженных тупиковых выработок при высоких температурах пород на основе шахтных передвижных кондиционеров // Записки Горного института. – 2019. – Т. 237. – С. 251-258. DOI: 10.31897/pmi.2019.3.251.

23. Березовская А.В., Фомин А.И. Факторы опасности здоровью шахтеров и меры противодействия этим рискам // Международный научно-исследовательский журнал. – 2023. – № 5(131). – С. 1-8. DOI: 10.23670/IRJ.2023.131.17.

24. Скопинцева О.В., Вертинский А.С., Иляхин С.В., Савельев Д.И., Прокопович А.Ю. Обоснование рациональных параметров обеспыливающей обработки угольного массива в шахтах // Горный журнал. – 2014. – № 5. – С. 17-20.

25. Borowski G., Smirnov Y.D., Ivanov A.V., Danilov A.S. Effectiveness of carboxymethyl cellulose solutions for dust suppression in the mining industry // International Journal of Coal Preparation and Utilization. 2020, vol. 42, no. 8. – P. 2345-2356. DOI: 10.1080/19392699. 2020.1841177.

26. Wang Q.G., Wang D.M., Wang H.T., Shen Y.D., Zhu X.L. Experimental investigations of a new surfactant adding device used for mine dust control // Powder Technology. 2018, no. 327. – P. 303-309.

27. Корнев А.В., Ледяев Н.В., Кабанов Е.И., Корнева М.В. Оценка прогнозной запыленности в забоях угольных шахт с учетом особенностей смачиваемости угольной пыли // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6-2. – С. 115-134. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_115.

28. Смирняков В.В., Родионов В.А., Смирнякова В.В., Орлов Ф.А. Влияние формы и размеров пылевых фракций на их распределение и накопление в горных выработках при изменении структуры воздушного потока // Записки Горного института. – 2022. – Т. 253. – С. 71–-81. DOI: 10.31897/PMI.2022.12.

*Статья поступила в редакцию 05.04.2024*
*Статья принята к публикации 17.06.2024*

УДК 331.453
EDN: FQDXNB

**ОЦЕНКА ПЫЛЕВОГО РЕЖИМА ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ УГОЛЬНЫХ СКЛАДОВ**

Автор(ы) 2024
SPIN: 4043-5453
AuthorID: 296391
ORCID: 0000-0002-7721-7246
ResearcherID: I-9283-2017
ScopusID: 56168675100

**ГЕНДЛЕР Семен Григорьевич**, доктор технических наук,
профессор кафедры «Безопасность производств», заведующий кафедрой «Безопасность производств»
*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II*
*(199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия Васильевского острова, д. 2., email: sgendler@mail.ru)*

SPIN: 4509-5158
AuthorID: 1130531
ORCID: 0000-0002-5027-4742
ScopusID: 58723881500

**СТЕПАНЦОВА Анастасия Юрьевна**, аспирант 2 курса кафедры «Безопасность производств»
*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II*
*(199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия Васильевского острова, д. 2., email: s215060@stud.spmi.ru)*

SPIN: 3192-0934
AuthorID: 56636
ORCID: 0000-0003-0054-2902
ResearcherID: AAG-3037-2019
ScopusID: 57193309886

**КУЗНЕЦОВ Владимир Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Геоэкология»
*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II*
*(199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия Васильевского острова, д. 2., email: s215060@stud.spmi.ru)*

**Аннотация.** Пыль, образующаяся в результате измельчения угля при его разгрузке на склады временного хранения – актуальная проблема для многих предприятий, в том числе обогатительных фабрик и тепловых электростанций. При открытом способе складирования угольного сырья пыль, разлетаясь в разные стороны, становится фактором негативного воздействия на здоровье рабочего персонала, а также наносит экологический ущерб прилежащим селитебельным зонам. Более того, открытое хранение угольного сырья приводит к снижению его экономических и энергетических показателей ввиду влияния внешних метеорологических факторов (ветер, дождь, снег). Решением данных проблем может стать сооружение специальных строений (закрытых складов). Однако, задача по снижению пыления от погрузо-разгрузочных работ становится приоритетной с точки зрения безопасности, так как концентрация угольной пыли в некоторых местах закрытого склада будет превышать предельно-допустимые значения. В данной работе проведено моделирование рассеивания угольной пыли на открытых и закрытых складах при различных скоростях ветра, а также произведен расчет классов условий труда для работников склада с учетом среднесменных концентраций в воздухе рабочей зоны склада закрытого типа.

**Ключевые слова:** уголь, угольная пыль, дисперсность пыли, угольный терминал, открытый склад угля, закрытый склад угля, воздействие на окружающую среду, пылевая нагрузка, класс условий труда, пылеподавление.

**DUST REGIME ASSESSMENT DURING THE OPERATIONS ON COAL WAREHOUSES**

The Author(s) 2024

**GENDLER Simeon Grigorievich**, doctor of Technical Sciences,
professor of «Industrial Safety» department, Head of the Department « Industrial Safety»
*Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University*
*(199106, St Petersburg, Russia, 2, 21st Line of Vasilyevsky Island, email:sgendler@mail.ru)*

**STEPANTSOVA Anastasiia Yurievna,** post-graduate student of «Industrial Safety» department
*Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University*
*(199106, St Petersburg, Russia, 2, 21st Line of Vasilyevsky Island, email: s215060@stud.spmi.ru)*

**KUZNETSOV Vladimir Sergeevich**, candidate of Technical Sciences, docent «Geoecology» department
*Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University*
*(199106, St Petersburg, Russia, 2, 21st Line of Vasilyevsky Island, email:sgendler@mail.ru)*

**Abstract.** Dust generated as a result of crushing of coal during its unloading to temporary storage warehouses is an urgent problem for many enterprises, including coal preparation plants and thermal power plants. At the open method

of coal raw material storage the dust, flying in different directions, becomes a factor of negative impact on the health of the working personnel, as well as causes environmental damage to the adjacent residential areas. Moreover, open storage of coal raw materials leads to a decrease in its economic and energy indicators due to the influence of external meteorological factors (wind, rain, snow). The solution to these problems can be the construction of special buildings (closed warehouses). However, the task of reducing dust from loading and unloading operations becomes a priority from the point of view of safety, as the concentration of coal dust in some places of the closed warehouse will exceed the maximum permissible values. In this paper modeling of coal dust dispersion in open and closed warehouses at different wind speeds is carried out, and also calculation of classes of working conditions for warehouse workers with regard to average shift concentrations in the working zone air of a closed warehouse is made.

**Keywords:** coal, coal dust, dust dispersibility, coal terminal, open coal storage, closed coal storage, environmental impact, dust load, labor conditions class, dust suppression.

***Для цитирования:*** *Гендлер С.Г. Оценка пылевого режима при эксплуатации угольных складов / С.Г. Гендлер, А.Ю. Степанцова, В.С. Кузнецов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 2(66). – С. 256-262. – EDN: FQDXNB.*

**Введение.** Угольная промышленность для России является одной из главных отраслей экономики. В своем производстве уголь используют обогатительные фабрики, коксохимические комбинаты, тепловые электростанции и прочие [1, 2]. Для обеспечения бесперебойной работы данных предприятий необходимо размещение и накопление угольного сырья непосредственно на прилегающей территории.

Сегодня для промежуточного хранения угля применяются, в большей степени, склады открытого типа, что приводит к измельчению (в процессе перегрузки), выветриванию, самовозгоранию и, как следствие, к ухудшению качества складируемого сырья ввиду влияния на него метеорологических факторов [3-5].

Так, одним из последних инцидентов на открытом складе стало загорание конвейера углеподготовки Новолипецкого металлургического комбината 14 ноября 2021 года. Официальной причиной возгорания была угольная пыль [6].

Более того, размещение угольных штабелей на открытой территории приводит к распространению угольной пыли как по складской площадке, так и за ее пределы. В ходе анализа литературных данных [7-9] было выявлено, что процессы транспортировки, пересыпки и формирования угольного штабеля являются преобладающими источниками выбросов угольной пыли, неконтролирование которых может привести к развитию профессиональных заболеваний рабочих угольного склада, а также к негативному влиянию на экологию прилегающих территорий [4, 10, 11].

В этой связи обеспечение товарной ценности угля, промышленной и экологической безопасности при хранении угля в местах временного складирования следует считать актуальной задачей.

Открытый склад угля представляет собой большую прикордонную зону (рис. 1), где уголь, приведенный в транспортабельное состояние, формируется в штабели для последующей погрузки на судно или запускается в производство.

В процессе размещения угольных штабелей на открытой территории сырье подвергается воздействию атмосферных осадков, приводящее к увеличению влажности угля, а также происходит выветривание и измельчение угля из-за температурных колебаний в случае его периодического промерзания и оттаивания [13-15].



*Рисунок 1 – Открытый склад АО "Восточный Порт" [12]*

Ввиду влияния вышеперечисленных факторов происходит изменение физико-химических и механических свойств угля: увеличение его зольности понижение теплоты сгорания, спекающей способности и др. и, как следствие, снижение содержания углерода и водорода и одновременно увеличение содержания кислорода [16-18]. В результате данных процессов происходит разрушение части органического вещества, что сказывается на качестве угля.

Помимо снижения технико-экономических показателей угольного сырья, необходимо проводить дополнительные мероприятия по минимизации негативного воздействия пыления на рабочий персонал открытого угольного склада и экологию. В этой связи был проведен расчет выбросов угольной пыли в атмосферу от эксплуатации открытых складов по отраслевой методике расчета [19].

На основе полученных данных выполнено компьютерное моделирование рассеивания угольной пыли с помощью программы УПРЗА «ЭКОЛОГ» версии 4.50. В качестве источников выделения угольной пыли рассматривались четыре открытых угольных штабеля высотой 26 м, шириной по основанию 65 м и протяженностью 600 м (проектная вместимость одного угольного штабеля составляет 338000 м$^3$ угля), а также используемое технологическое оборудование (стакер, реклаймер). Результаты приведены в таблице 1.

Анализ полученных данных показал, что наибольшее превышение ПДК=0,3 мг/м$^3$ для угольной пыли (почти в 7 раз) наблюдается непосредственно вблизи источников пыления, то есть на территории самого склада при скорости ветра 2 м/с.

Однако область аэротехногенного воздействия охватывает достаточно большую прилегающую к складу территорию, что может оказывать негативное влияние на окружающую среду, в том числе на водные ресурсы данной местности.

Таким образом, при размещении угольных штабелей на складах открытого типа необходимо учитывать влияние климатических условий региона (скорость ветра, температура воздуха, атмосферные осадки), способствующие снижению теплоэнергетических свойств угольного сырья и распространению угольной пыли во время погрузо-разгрузочных операций и непосредственном хранении.

*Таблица 1 – Сводные данные по рассеиванию угольной пыли в зависимости от скорости ветра [составлено авторами]*

| Точка замера | Скорость ветра | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 2 м/с | | 5 м/с | | 7 м/с | |
| | С, мг/м$^3$ | С/ПДК | С, мг/м$^3$ | С/ПДК | С, мг/м$^3$ | С/ПДК |
| На территории угольного склада | 2,077 | 6,92 | 0,608 | 2,03 | 0,281 | 0,94 |
| 300 м от источника пыления | 1,738 | 5,79 | 0,387 | 1,29 | 0,142 | 0,47 |
| 500 м от источника пыления | 1,960 | 6,53 | 0,465 | 1,55 | 0,179 | 0,60 |

**Методология.** Одним из методов решения проблемы снижения аэротехногенного воздействия угольной пыли является использование закрытых складов, которые представляют собой ряд наземных сооружений (рис. 2), где уголь размещается с исключением влияния внешних метеорологических условий [4, 20].

Загрузка угля и формирование штабелей на склад закрытого типа осуществляется при помощи сбрасывающей тележки, расположенной под коньком крыши. Данный метод исключает необходимость использования громоздких грейферных кранов или стакеров, применяемых на открытых складах, тем самым упрощая технологический процесс и снижая эксплуатационные затраты [21, 22].

Разгрузка склада выполняется при помощи портального реклаймера посредством двух систем скребков, сгружающих уголь на ленточный конвейер, расположенный вдоль склада.

В этой связи, источниками пыления в складах закрытого типа будут, во-первых, погрузо-разгрузочные устройства (реклаймер, ленточный конвейер, сбрасывающая тележка), осуществляющие загрузку и разгрузку сырья, а во-вторых, угольный штабель, представляющий собой усеченную пирамиду, с поверхности которого происходит срыв пыли.

Пыление от угольного штабеля оценивалось по отраслевой методике расчета [19 с. 47]. Графическая зависимость выбросов пыли от угольного штабеля при разных скоростях движения воздуха в складе приведена на рисунке 3.

Ввиду незначительной скорости движения воздуха внутри склада (0,5-1 м/с) пыление с поверхности штабеля будет минимальным (0,02 г/с для угольного штабеля объемом 338 000 м$^3$). Однако, как показывают расчеты, с увеличением скорости потока воздуха, процесс пыления с поверхности угольного штабеля в закрытом пространстве склада интенсифицируется. Но даже при скорости движения воздуха 5 м/с максимально-разовый выброс угольной пыли с поверхности штабеля не превышает предельно допустимое значение среднесуточной концентрации 10 мг/м$^3$, установленное СанПиНом 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания", следовательно, пыление от штабеля угля не представляет опасности для рабочих, обслуживающих закрытый склад.

Помимо пыления от поверхности угольного штабеля необходимо учитывать пылевыделение от технологических операций, связанных с разгрузкой

угля и формированием штабелей. Эти процессы, также как, и на складах открытого типа, сопровождаются интенсивным пылевыделением ввиду измельчения угольных кусков, преимущественно в процессе штабелирования угля. В этой связи было выполнено компьютерное моделирование суммарного рассеивания угольной пыли от работы сбрасываемой тележки и портального реклаймера при скорости движения воздуха внутри склада 1 м/с. Полученные данные приведены в таблице 2.

На рисунке 4 представлено схематическое изображение закрытого угольного склада, погрузо-разгрузочного оборудования и номеров контрольных точек 1-5.

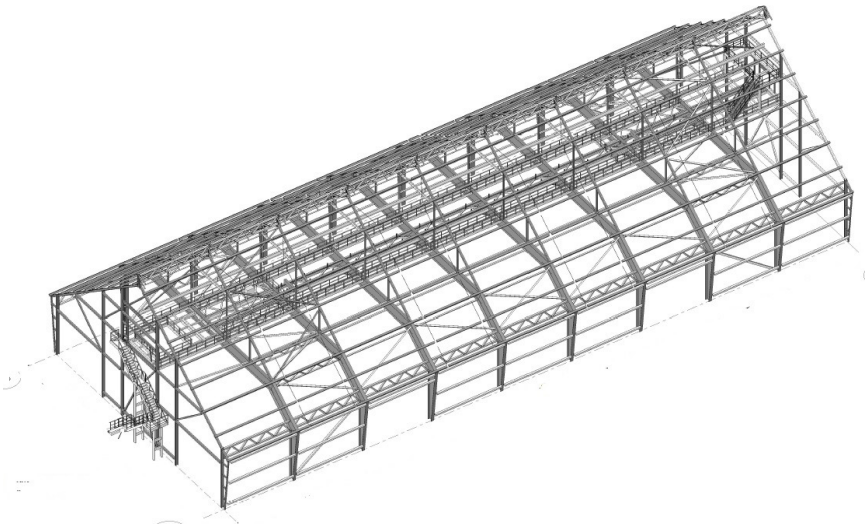


*Рисунок 2 – Закрытый угольный склад [составлено авторами]*

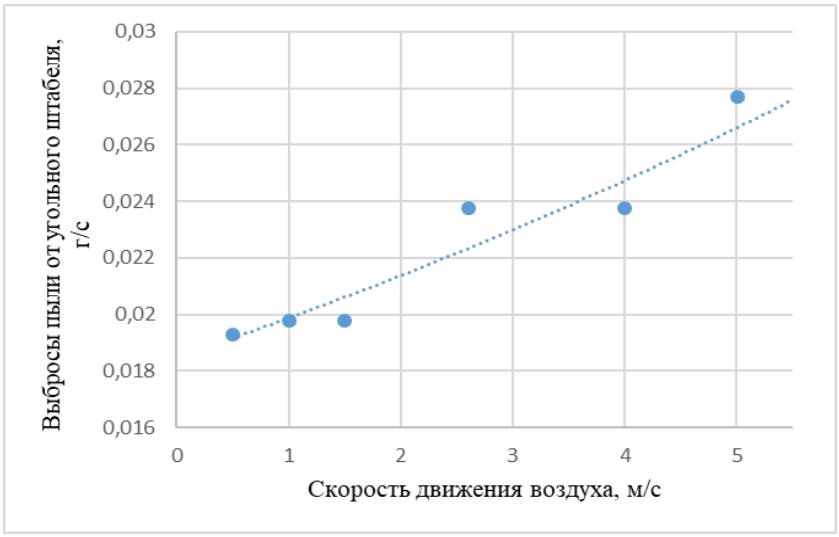



*Рисунок 3 – График зависимости выбросов угольной пыли от штабеля при различных скоростях воздуха. Корреляционное соотношение* $\sqrt{0,94}$ *[составлено авторами]*

*Таблица 2 – Сводные данные по зависимости концентрации угольной пыли от высоты штабеля [составлено авторами]*

| Номер контрольной точки, в соответствии с рисунком 4 | Высота штабеля | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 2 м | 5 м | 10 м | 25 м |
| | С, мг/м$^3$ | С, мг/м$^3$ | С, мг/м$^3$ | С, мг/м$^3$ |
| 1 | 7,7228 | 6,323 | 3,1871 | 0,9495 |
| 2 | 9,0791 | 8,987 | 5,3822 | 2,0453 |
| 3 | 12,9375 | 11,268 | 7,1455 | 4,0147 |
| 4 | 9,4486 | 8,143 | 5,3516 | 2,0414 |
| 5 | 7,7014 | 6,313 | 3,1826 | 0,9492 |

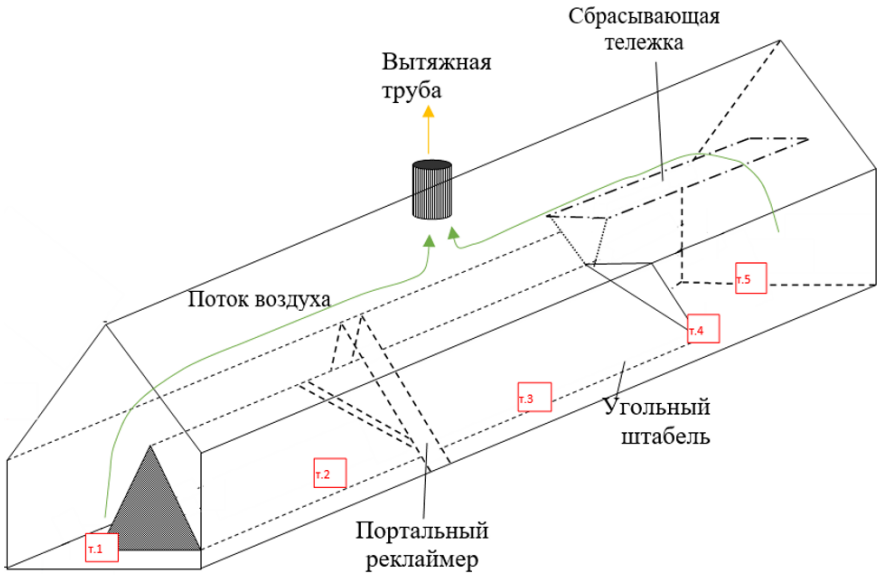



*Рисунок 4 – Схематическое изображение закрытого угольного склада, погрузо-разгрузочного оборудования и точек замера концентрации угольной пыли [составлено авторами]*

**Результаты.** По результатам моделирования концентрация угольной пыли в воздухе рабочей зоны (2 м от пола) будет снижаться с увеличением высоты угольного штабеля. Это можно объяснить тем, что с увеличением объема угольного штабеля уменьшается объем воздуха на складе, не занятый углем. В то же время, витающая в воздухе пыль будет быстрее осаждаться на поверхности угольного штабеля ввиду увеличения его высоты.

В этой связи, необходимым условием обеспечение безопасной эксплуатации угольного склада закрытого типа по пылевому фактору является расчет выбросов угольной пыли (от всех источников пыления) в воздух рабочей зоны и сравнение полученных значений с ПДК.

В любом случае, наличие в воздухе рабочей зоны угольной пыли с концентрацией выше предельно-допустимой может негативно сказываться на персонал, обслуживающий закрытый склад. В этой связи, был проведен расчет пылевой нагрузки и контрольно-пылевой нагрузки (в соответствии с Методикой расчета руководства по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса) для данного рабочего места.

Обслуживание технологического оборудования закрытых складов угля не предусматривает наличие постоянных стационарных рабочих мест, поэтому расчет пылевой нагрузки осуществляется с учетом фактически отработанного времени. Определение среднесменной концентрации проводилось по следующей формуле [23]:

$$К = \frac{k_1 \cdot t_1 + k_2 \cdot t_2 + k_3 \cdot t_3 \dots + k_n \cdot t_n}{T} \quad (1)$$

где: $k_1$-$k_n$ – фактические среднесменные концентрации за отдельные периоды работы;

$t_1$-$t_n$ – периоды работы, за время которых фактические концентрации пыли были постоянны;

$T$ – суммарное время работы.

При расчете среднесменной концентрации, приняв наиболее неблагоприятные условия (табл. 2), получим концентрацию угольной пыли более 10 мг/м$^3$. Таким образом, необходимо применение мер (организационных, технических, лечебно-профилактических и др) по защите рабочих от воздействия угольной пыли.

**Обсуждение.** Расчет допустимого стажа работы с учетом фактической концентрации угольной пыли в воздухе рабочей зоны является примером организационных мер по снижению негативного влияния угольной пыли на здоровье работника и производится по следующей формуле [24, 25]:

$$C = КПН_{25}/KNQ, \quad (2)$$

где: $C$ – допустимый стаж работы в данных условиях, год;

$КПН_{25}$ – контрольная пылевая нагрузка за 25 лет работы в условиях соблюдения ПДК;

$K$ – фактическая среднесменная концентрация пыли;

$N$ – количество смен в календарном году;

$Q$ – объем легочной вентиляции за смену.

Кратность превышения контрольно-пылевой нагрузки более 1 свидетельствует о наличии опасностей для здоровья работников склада и указывает на наличие вредного класса условий труда по данному фактору, что обязывает работодателя принять необходимые меры.

Очевидно, что с увеличением среднесменной концентрации пыли в воздухе рабочей зоны закрытого угольного склада допустимый срок работы будет снижаться. Так, например, при среднесменной концентрации угольной пыли 13 мг/м$^3$ допустимый стаж работы снизится на 5 лет.

График зависимости допустимого стажа работы от класса условий труда представлен на рисунке 5.

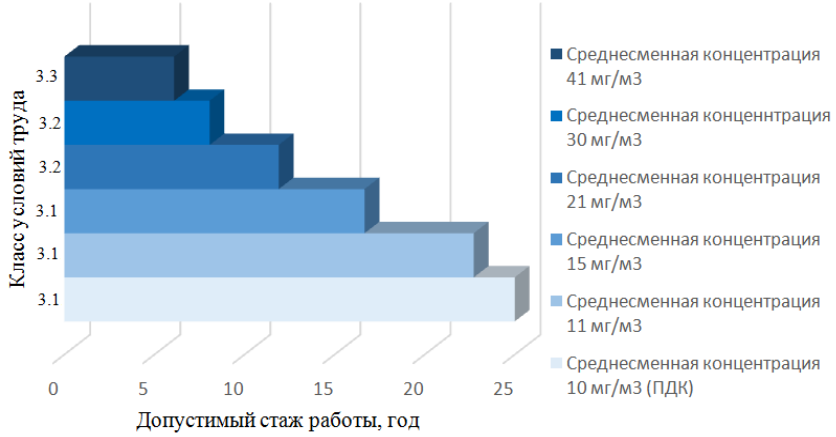



*Рисунок 5 – График зависимости допустимого стажа работы от класса условий труда. [составлено авторами]*

Помимо вышеописанного метода защиты от воздействия угольной пыли на персонал, обязательно применение аспирационных систем, основанных на удалении загрязненного воздуха из рабочих зон с последующей его очисткой (циклоны, скрубберы, рукавные и кассетные фильтры).

Ввиду технологических особенностей эксплуатации закрытых угольных складов, а также внушительных габаритов, скопления угольной пыли будут преимущественно локализованы вблизи источников пыления (портального реклаймера, сбрасывающей тележки). В этой связи рациональным будет применение систем пылеподавления непосредственно вблизи погрузо-разгрузочных работ (дисперсионная и оросительная форсуночная системы).

Средства индивидуальной защиты органов дыхания – респираторы, специальные шлемы и скафандры с подачей в них чистого воздуха применяются в тех случаях, когда не удается снизить запыленность воздуха в рабочей зоне до допустимых пределов более радикальными технологическими мероприятиями.

**Выводы.** Хранение угольного сырья на складах – неотъемлемый этап технологического процесса, позволяющий обеспечить необходимый запас угля для устойчивой эксплуатации углеобогатительных фабрик, коксохимических заводов, тепловых электростанций и прочих.

Альтернативой складам открытого типа, негативно влияющих на экологию прилежащих территорий, а также на технико-экономические свойства хранимого сырья и здоровье работников предприятия, являются закрытые склады, которые позволяют исключить влияние погодных условий на угольное сырье, а также минимизировать выбросы угольной пыли в атмосферу.

Одной из проблем эксплуатации закрытого угольного склада является угольная пыль, распространение которой ограничено внутренним объемом помещения, вследствие чего концентрация пыли в нем может значительно превышать предельнодопустимые значения и негативно сказываться на здоровье обслуживающего персонала, а при значительном скоплении угольной пыли – привести к ее взрыву. В этой связи, регламент эксплуатации закрытых складов должен быть ориентирован на решение задач по обеспечению охраны труда и промышленной безопасности.

Среднесменная концентрация угольной пыли в воздухе рабочей зоны, превышающая 10 мг/м$^3$, негативно сказывается на здоровье обслуживающего персонала, тем самым сокращая допустимый стаж работы на данном рабочем месте. Так, по результатам расчетов, при среднесменной концентрации угольной пыли 15 мг/м$^3$ допустимый стаж работы 16 лет, а при 20 мг/м$^3$ – 12,5 лет.

Обеспечение нормативных значений концентрации угольной пыли в объеме закрытого склада возможно с учетом применения систем пылеподавления и аспирационных систем пылеулавливания.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Альмухаметова С.Г. Переход открытых складов угля к закрытым как решение проблемы выбросов пыли в окружающую среду // Материалы XIX молодёжной международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных (г. Санкт-Петербург, 19.05-20.05.2020) Научно-издательский центр «Открытие». – 2020. – С. 25-28. – EDN: MDUDDQ.

2. Корнев А.В., Корнева М.В., Сафина А.М. Роль пылевого фактора в вопросах обеспечения промышленной безопасности и охраны труда на предприятиях угледобывающей отрасли // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № S60-2. – С. 322-334.

3. Мазуренко О.И., Русинов И.А. Анализ современного состояния и перспектив развития морских угольных терминалов портов России // Транспортное дело России. – 2020. – № 4. – С. 154-159. – EDN: EIXFVK.

4. Гендлер С.Г., Василенко Т.А., Степанцова А.Ю. Экспериментальные исследования параметров массопереноса в каменных углях // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 9-1. – С. 135–148. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_91_0_135.

5. Танков А.М., Салихов В.А. Оценка влияния на экологию условий хранения угля в открытых и закрытых угольных складах Кузбасса // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2022: Сборник материалов XIX Международной научно-практической конференции, Кемерово, 23-24 ноября 2022 года / Редколлегия: А.А. Хорешок (отв. редактор), А.И. Фомин [и др.]. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет

имени Т.Ф. Горбачева, 2022. – С. 116.1-116.5. EDN: DZPLFS.

6. Газета.RU [сайт] – 2021. URL: https://www.gazeta.ru/social/2021/11/14/14202967.shtml?ysclid=lv2a29x5wp317071332 – Газета.Ru (gazeta.ru) (дата обращения 05.04.2024).

7. Кривопишина М.Е. Рациональное оснащение терминала морского порта для экспортного угля // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. – 2021. – № 1. – С. 86-90. EDN: GOGGJT.

8. Черепанов Р.Ю. Экологическая безопасность на угольном терминале в порту Ванино / Р.Ю. Черепанов, А.С. Соловьев // Актуальные проблемы строительства, ЖКХ и техносферной безопасности: Материалы X Всероссийской (с международным участием) научно-технической конференции молодых исследователей, Волгоград, 24-29 апреля 2023 года / Под общей редакцией Н.Ю. Ермиловой, И.Е. Степановой. – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2023. – С. 319-320. – EDN: GNVHYJ.

9. Smirnyakov V.V., Smirnyakova V.V., Pekarchuk D.S., Orlov F.A. Analysis of methane and dust explosions in modern coal mines in Russia // International Journal of Civil Engineering and Technology. – 2019. – №10. – С. 1917-1929. EDN: HQPQMN.

10. Васина Д., Рапопорт И., Тесленко И. Решение экологических проблем открытых угольных терминалов Владивостока // International journal of professional science. – 2021. – №6.

11. Руш Е.А., Власова Н.В. Перспективные мероприятия, направленные на экологическую защиту при работе с углем на производственных участках терминально-складского комплекса //Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2023. – №. 2 (78). – С. 20-32. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.2(78).20-32.

12. Уголь Дальнего Востока [сайт] – 2024. URL: https://flectone.ru/ugol-dalnego-vostoka.html (дата обращения 05.04.2024).

13. Потехина А.М., Деканова Н.П. Перспективные объемы грузоперевозок на восточном полигоне до 2030 года // Современная российская наука: актуальные вопросы: сборник статей VII всероссийской научно-практической конференции, г. Пенза, 15 марта 2024/ МЦНС «НАУКА и просвещение» под ред: Г.Ю. Гуляева. – Пенза, 2024. – С. 17-19. EDN: CAUCXR.

14. Костюничев Д.Н., Отделкин Н.С. Оценка работоспособности сетчатых экранов по снижению пылевыбросов сыпучих грузов с открытых складов портов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. – 2024. – Т 16. – №. 1. – С. 55-63. DOI:10.21821/2309-5180-2024-16-1-55-63

15. Родионов В.А., Цыганков В.Д., Жихарев С.Я., Кормщиков Д.С. Методика исследования аэродинамических свойств каменноугольной пыли в протяженных горизонтальных выработках // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 10. – С. 69-79. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_10_0_69.

16. Коршунов Г.И., Спицын А.А., Баженова В.А. Разработка способа снижения выделения респирабельной фракции пыли в атмосферу разреза за счет рекультивации пылящих источников // Безопасность труда в промышленности. – 2022. – №6. – С. 27-32. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-6-27-32.

17. Эпштейн С.А., Красилова В.А., Добрякова Н.Н. Влияние окисленности каменных углей на содержание в них макро-и микроэлементов //Химическая промышленность сегодня. – 2023. – №. 1. – С. 45-51. DOI: 10.53884/27132854_2023_1_45.

18. Ильин В.В. Обоснование методики выбора крытых заглубленных складов и основной перегрузочной машины на балкерных терминалах / В.В. Ильин // Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы: Сборник докладов XXII Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, Москва, 04 апреля 2019 года. – Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2019. – С. 86-89. – EDN: NWOOPA.

19. Департамент угольной промышленности министерства энергетики Российской Федерации: Отраслевая методика расчета количества отходящих, уловленных и выбрасываемых в атмосферу вредных веществ предприятиями по добыче угля. – Пермь, 2003. – 115 с.

20. Перминов В.Ю. Внедрение крытых заглубленных складов на угольных терминалах морских портов Тамань, Ванино, Лавна для повышения экономической рентабельности и экологической безопасности / В.Ю. Перминов, Е.И. Фомин // Социально-экономические аспекты принятия управленческих решений: Материалы пятого научного семинара, Москва, 26 февраля 2021 года. – Москва: Академия ГПС МЧС России, 2021. – С. 22-29. EDN: QQMMMI.

21. Смирняков В.В., Родионов В.А., Смирнякова В.В., Орлов Ф.А. Влияние формы и размеров пылевых фракций на их распределение и накопление в горных выработках при изменении структуры воздушного потока // Записки Горного института. – 2022. – Т. 253. – С. 71-81. DOI: 10.31897/PMI.2022.12.

22. Майорова Л.П., Лукьянов А.И., Дахова Е.В. Моделирование распространения взвеси угольной пыли при хранении и погрузочно-разгрузочных работах в портах (на примере порта Ванино) // Инновации и инвестиции. – 2021. – №7. – С. 89-94. EDN: URYDGE

23. Егорова А.М., Луценко Л.А., Сухова А.В., Колюка В.В., Федорович Г.В. К вопросу оценки профессионального риска заболеваний пылевой этиологии // Здравоохранение РФ. – 2021. – №4. – С. 354-458. DOI: 10.47470/0044-197X-2021-65-4-354-358

24. Павлидис С.Б. Оценка рисков при анализе пылевой нагрузки производственной среды предприятий горнорудной промышленности //Фундаментальные и прикладные аспекты развития современной науки. – 2021. – С. 10-17. EDN: SODUZM

25. Малиновский Н.С., Мишура Т.П., Степашкина А.С. Проблемы запыленности окружающей среды и универсальные методы контроля пылевой нагрузки // Высокие технологии и инновации в науке. – 2020. – С. 155-160. EDN: FLQCXF.

*Статья поступила в редакцию 25.04.2024*
*Статья принята к публикации 17.06.2024*

УДК 004. 82
EDN: JFNLRG

# ПРОТОТИП ТЕХНИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА ОБНАРУЖЕНИЯ ПОЖАРА, ПОСТРОЕННЫЙ НА ПРИНЦИПАХ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

© Автор(ы) 2024

SPIN: 9999-3796
AuthorID: 703733
ORCID: 0000-0001-7936-4517
ResearcherID: S-5079-2017
ScopusID: 57201959692

**АНДРЕЕВ Андрей Викторович**, кандидат военных наук, доцент,
директор Высшей школы техносферной безопасности
*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*
*(195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, e-mail: andreev_av@spbstu.ru)*

SPIN: 8286-5957
AuthorID: 805309
ORCID: 0000-0002-0567-3875
ResearcherID: Q-4441-2017
ScopusID: 57205428468

**ДОРОНИН Александр Сергеевич**, аспирант, ассистент Высшей школы техносферной безопасности
*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*
*(195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, e-mail: doronin_as@spbstu.ru)*

SPIN: 6093-4320
AuthorID: 1076060
ORCID: 0000-0002-1911-9904
ResearcherID: ADD-1836-2022
ScopusID: 58103262700

**КАЧЕНКОВА Валерия Дмитриевна**, аспирант, ассистент Высшей школы техносферной безопасности
*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*
*(195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, e-mail: kachenkova_vd@spbstu.ru)*

**Аннотация**. В статье представлены результаты разработки прототипа технического устройства для обнаружения пожара, работа которого основана на принципах искусственного интеллекта. Целью исследования является обоснование и разработка прототипа технического устройства, использующего методы машинного обучения для раннего обнаружения пожаров с целью минимизации ущерба и спасения человеческих жизней. Обработанные статистические данные за пять лет позволили сделать вывод о недостаточной скорости срабатывания существующих систем пожарной автоматики, обнаруживающих первичные признаки пожара. Данный вывод позволил сформулировать гипотезу о целесообразности верифицировать признаки пожара с использованием дополнительного канала, работающего на принципах искусственного интеллекта. Структурная схема прототипа, разработана на основе типовой структуры существующего парка систем пожарной автоматики. В статье описывается принцип работы дополнительного канала, в том числе использование алгоритмов нечеткой логики и сверточных нейронных сетей для анализа данных с видеокамер и от различных пожарных извещателей с целью определения вероятности возникновения пожара на ранних этапах. Приведено описание дополнительных элементов и краткое описание их назначения. Для подтверждения сформулированной гипотезы проведено экспериментальное сравнение времени срабатывания дымового пожарного извещателя и блока элементов, работающего на принципах искусственного интеллекта. Результаты эксперимента показывают, что быстродействие блока элементов, работающих на принципах искусственного интеллекта, превышает время срабатывания существующей системы пожарной автоматики не менее чем в два раза. В статье кратко освещены проблемные вопросы нормативного регулирования использования элементов, работающих на принципах искусственного интеллекта, в системах пожарной автоматики.

**Ключевые слова:** система пожарной автоматики, искусственный интеллект, раннее обнаружение пожаров, безопасность зданий, алгоритмы машинного обучения, пожарные извещатели, нечеткая логика.

# PROSPECTS FOR USING NEURAL NETWORKS TO INCREASE THE RELIABILITY OF FIRE SAFETY SYSTEMS

© The Author(s) 2024

**ANDREEV Andrey Viktorovich**, candidate of military sciences,
director of the Higher School of Technosphere Security
*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*
*(195251, Russia, St. Petersburg, Polytechnicheskaya str., 29, e-mail: andreev_av@spbstu.ru)*

**DORONIN Alexander Sergeevich**, postgraduate student, assistant of the Higher School of Technosphere Safety
*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*
*(195251, Russia, St. Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29, e-mail: doronin_as@spbstu.ru)*
**KACHENKOVA Valeria Dmitrievna**, graduate student, assistant at the Higher School of Technosphere Safety
*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*
*(195251, Russia, St. Petersburg, Politekhnicheskaya str., 29, e-mail: kachenkova_vd@spbstu.ru)*

**Abstract.** The article presents the results of the development of a prototype technical device for fire detection, the operation of which is based on the principles of artificial intelligence. The purpose of the research is to substantiate and develop a prototype of a technical device that uses machine learning methods for early detection of fires in order to minimize damage and save human lives. Processed statistical data for five years allowed us to conclude that the response speed of existing fire automatic systems that detect primary signs of a fire is insufficient. This conclusion allowed us to formulate a hypothesis about the advisability of verifying signs of a fire using an additional channel operating on the principles of artificial intelligence. The structural diagram of the prototype was developed based on the typical structure of the existing fleet of fire automatic systems. The article describes the principle of operation of the additional channel, including the use of fuzzy logic algorithms and convolutional neural networks to analyze data from video cameras and from various fire detectors in order to determine the likelihood of a fire occurring in the early stages. A description of additional elements and a brief description of their purpose is provided. To confirm the formulated hypothesis, an experimental comparison of the response time of a smoke fire detector and a block of elements operating on the principles of artificial intelligence was carried out. The results of the experiment show that the speed of the block of elements operating on the principles of artificial intelligence exceeds the response time of the existing fire automatic system by at least twice. The article briefly highlights problematic issues of regulatory regulation of the use of elements operating on the principles of artificial intelligence in fire automatic systems.

**Keywords:** fire automatic system, artificial intelligence, early fire detection, building safety, machine learning algorithms, fire detectors, fuzzy logic.

***Для цитирования:*** *Андреев А.В. Прототип технического устройства обнаружения пожара, построенный на принципах искусственного интеллекта / А.В. Андреев, А.С. Доронин, В.Д. Каченкова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 2(66). – С. 263-267. – EDN: JFNLRG.*

**Введение.** На всем протяжении существования цивилизации проблема пожаров остается одной из наиболее актуальных и серьезных, поскольку приводит к гибели людей, материальному ущербу, а также вызывает социальные и экономические последствия. Пожары возникают как в жилых, так и в промышленных объектах, на транспорте, в природных экосистемах, и вызваны различными причинами. Основной причиной пожаров с групповой гибелью людей (5 человек и более) является нарушение правил эксплуатации электрооборудования и неосторожное обращение с огнем, при этом в большинстве случаев были нарушены требования пожарной безопасности, в том числе имело место несвоевременное срабатывание систем пожарной автоматики (СПА). Обработанные данные статистики пожаров свидетельствуют, что в 82,2% случаев пожаров СПА сработала и выполнила задачу (исправное состояние), в 13,5% случаев – система не сработала или не смогла выполнить поставленную задачу (неисправное состояние), в 4,3% – система была выключена (нерабочее состояние) [1-3]. Нормативной базой РФ для СПА установлена вероятность обнаружения пожара не менее 0.95, т.е. анализ статистических данных позволяет сделать вывод о недостаточной эффективности существующего парка систем пожарной автоматики [4-9].

Авторами сформулирована гипотеза, что одним из путей повышения эффективности функционирования СПА является интеграция в систему дополнительного канала, построенного на принципах искусственного интеллекта (ИИ). Авторами проведено исследование, в результате которого установлено, что нейронная сеть, заданной архитектуры, идентифицирует явление горения с вероятность не менее 0,97. Выводы исследования в статье не приводятся.

Целью работы является обоснование эффективности внедрения прототипа технического решения, построенного на принципах искусственного интеллекта, позволяющего повысить надежность работы систем пожарной автоматики (СПА), а именно уменьшить время обнаружения пожара и сократить количество ложных срабатываний.

**Методология.** Для подтверждения гипотезы авторами выбран подход – прототипирование, создание работающего технического устройства для тестирования сформулированной гипотезы, выявления преимуществ и недостатков. Перед проектированием прототипа было проведено исследование существующего парка СПА [8-11]. Большинство современных СПА имеют типовую структуру, состоящую из: извещателей пожарных (ИП), пожарного приемно-контрольный прибора (ППКП), прибора управления пожарного (ПУП), системы оповещения и управления эвакуацией (СОУЭ), автоматических установок пожаротушения (АУПТ) и других систем.

Типовая структурная схема СПА представлена на рисунке 1.

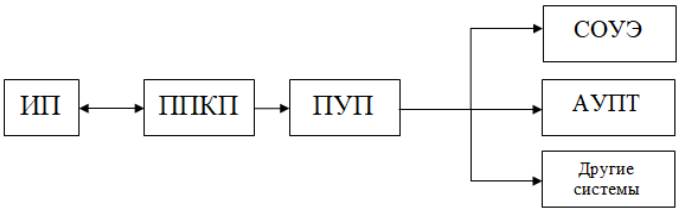



*Рисунок 1 – Структурная схема СПА*

При превышении порога срабатывания пожарный извещатель генерирует и передает сигнал на ППКП, который является техническим средством, предназначенным для приема, обработки и отображения сигналов от ИП и иных устройств, взаимодействующих с ППКП, контроля целостности и функционирования линий связи между ППКП и ИП или другими устройствами. После ППКП передает информацию на ПУП, который запускает другие системы.

Реализация прототипа СПА состоит в том, что конструктивные элементы, функционирующие на принципах ИИ, технически объединены в единый блок (далее блок), интегрированный в один из существующих типов пожарной автоматики и обменивающийся информацией с ППКП. Предлагается следующий состав конструктивных элементов блока:

1. Видеокамеры, захватывающие изображение путем преобразования их в электрические сигналы, в большинстве случаев в видеосигнал. Размещение и требования к камерам зависят от требований к объекту защиты.

2. Блок анализа информации с видеокамеры, который отвечает за обнаружение признаков пожара в видеопотоке, при этом используются алгоритмы компьютерного зрения, основанные на глубоком обучении нейронных сетей. Данное устройство должно производить: захват видеопотока, предварительную обработку для улучшения качества изображения, детектирование объектов с применением алгоритмов компьютерного зрения, классификацию обнаруженных объектов для определения признаков пожара, а также оценку вероятности наличия пожара и генерацию уведомления в случае обнаружения признаков.

3. Устройство для обмена информацией с ППКП (УОИ) используется для передачи данных о возникновении пожарной угрозы с места возгорания на ППКП и обмена информацией с другими извещателями. [2]

Использование устройства для обмена информацией позволяет интегрировать техническое средство в имеющуюся систему пожарной автоматики, что обеспечивает взаимодействие между техническим средством и другими компонентами системы. Обмен информацией с ППКП позволяет уменьшить количество ложных срабатываний, что повышает эффективность работы СПА.

Анализ и интерпретация данных, получаемых устройством обмена информацией с ППКП, производятся блоком анализа информации, принцип работы основывается на интеграции нескольких передовых методов ИИ. Центральное место в системе занимает обработка изображений и компьютерное зрение, реализованные через свёрточные нейронные сети (*CNN*), позволяющие детектировать признаки дыма и огня в реальном времени. Дополнительно используется машинное обучение и глубокое обучение, где модели, обученные на больших наборах данных, могут классифицировать и прогнозировать пожарные ситуации с высокой точностью. Для повышения надёжности и точности система объединяет данные с различных датчиков, таких как датчики дыма, тепла и газа, применяя методы нечеткой логики, которые позволяют работать с нечеткими или неопределенными данными, используя лингвистические переменные и правила. Данный подход позволяет анализировать информацию, полученную от видеокамер и пожарных извещателей.

**Результаты.** Структурная схема прототипа СПА, включающего конструктивные элементы, работающие на принципах ИИ, приведена на рисунке 2.

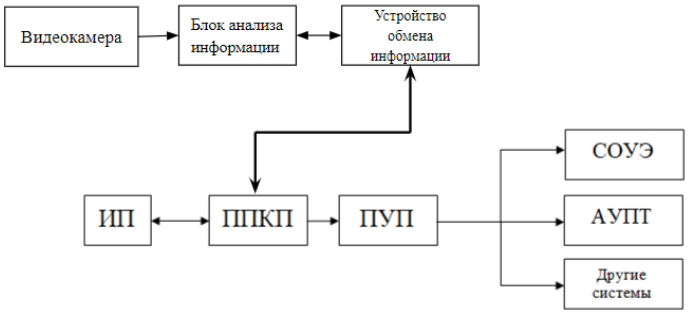



*Рисунок 2 – Структурная схема прототипа СПА*

Для определения вероятности возгорания используются нечеткие множества для каждого признака пожара и задаются лингвистические переменные (например, «низкая», «средняя», «высокая»). [8-13] Выход определяется как три возможных состояния (набора): нет огня, потенциальный пожар и пожар. В систему закодированы нечеткие правила, описывающие комбинации различных наборов, которые указывают на пожар, отсутствие пожара или потенциальный пожар. Обученная система снимает необработанные показания с датчиков, усредняет их для получения результата. Видеосигнал фазифицируется (переводятся в нечеткий формат), производится его оценка в соответствие с нечеткими правилами. Нейронная сеть определяет наличие признаков пожара в видеоизображении, в результате формируется сигнал о наличии пожара.

Предлагаемый подход функционирования прототипа создает более гибкую и адаптивную систему обнаружения пожара, способную эффективно реагировать на различные условия окружающей среды, минимизируя вероятность ложных срабатываний.

С целью оценки быстродействия прототипа было проведено экспериментальное сравнение времени срабатывания, блока элементов, работающих на принципах ИИ, со временем срабатывания существующей СПА.[19-20] Для эксперимента использовался макет склада с трехъярусными стеллажами, на которых стояли деревянные паллеты с коробками в два ряда, имеющими размеры 0,5 х 0,5 х 0,5 м. В эксперименте для сравнения использовалась СПА с извещателями пожарными дымовыми (ИПД). Порог срабатывания ИПД с фотоэлектрическим элементом, оценивающим оптическую плотность среды, был установлен на 0,15 дБ/м. СПА сработала через 112 секунд после начала возгорания. Предлагаемый к прототипу блок сгенерировал сигнал тревоги на 26-ой секунде. Для анализа полученных данных показания были нормализированы и представлены на рисунке 3. Из графика следует, что время обнаружения пожара блоком по сравнению с СПА уменьшилось на 83%. Учитывая временные задержки алгоритма дополнительной проверки СПА математически рассчитано, что среднее время выработки сигнала «пожар» прототипом СПА сокращается на 76% по сравнению с СПА, участвовавшей в эксперименте.

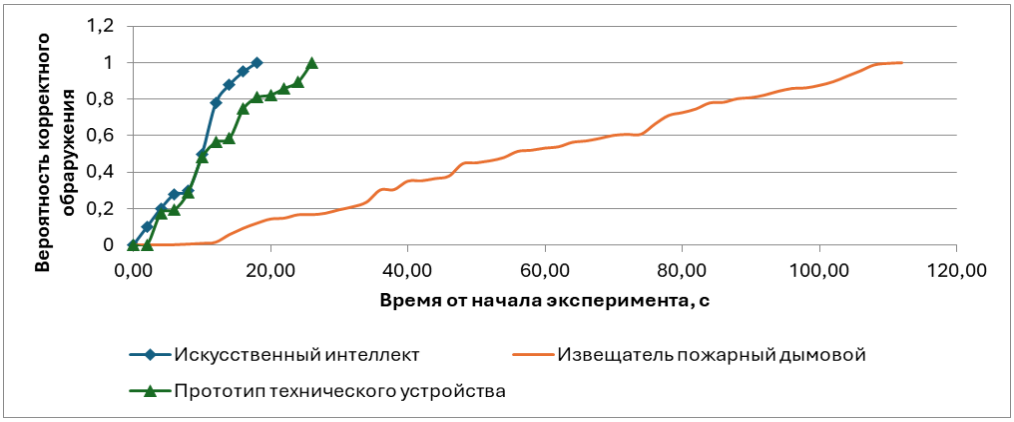



*Рисунок 3 – Графики времени обнаружения пожара*

Проведенный эксперимент позволяет сделать вывод о целесообразности использования элементов ИИ в системах пожарной автоматики.

**Обсуждение.** Также актуальным является вопрос о нормативном регулировании применения ИИ в системах пожарной автоматики. Проведенный анализ законодательства РФ в области пожарной безопасности позволяет сделать вывод о том, что применение искусственного интеллекта в системах пожарной автоматики не регламентировано. Законы и нормативные документы устанавливают общие требования к пожарной безопасности, требования к оборудованию, но не определяют механизмы применения искусственного интеллекта для этих целей. В Российской Федерации отсутствуют нормативные документы, которые регулируют использование искусственного интеллекта в контексте пожарной безопасности. Однако в приказе МЧС России от 31.07.2020 №582 указано, что СПА не должны выполнять функции, не связанные с противопожарной защитой, за исключением следующих функций, использующих общие исполнительные устройства. Таким образом, можно сделать вывод о том, что СПА не должна анализировать видеопоток на предмет наличия пожара. Данное положение противоречит положениям ГОСТ Р 53325-2012. Из выше приведенного следует вывод о необходимости корректировки национального законодательства в области пожарной безопасности. [19-22].

**Выводы.** Результаты исследования позволяют сделать следующие выводы: 1. Предлагаемый прототип СПА показал достаточную эффективность в обнаружении начальных стадий возгорания и инициировании процесса эвакуации, продемонстрировав более быструю и точную реакцию на пожарные угрозы по сравнению с существующими системами пожарной автоматики. 2. Экспериментальные исследования подтвердили работос-

пособность предлагаемой системы. 3. Предлагаемый прототип с более высокой степенью детализации может быть использован в качестве основы полнофункционального продукта пожарной безопасности. 4. Нормативно-правовая база РФ, в области пожарной безопасности, требует корректировки в вопросах применения ИИ в СПА.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Fire alarm systems construction on artificial intelligence principles / A. Andreev, A. Doronin, V. Kachenkova [et al.] // E3S Web of Conferences. – 2023. – V. 365. – P. 04028. – DOI 10.1051/e3sconf/202336504028. – EDN: IGQUAH.

2. Андреев, А.В. Перспективы построения систем пожарной сигнализации на принципах искусственного интеллекта (на примере газовых пожарных извещателей) / А.В. Андреев, А.С. Доронин, С.Н. Терехин // Научно-аналитический журнал "Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России". – 2022. – № 1. – С. 65-74. – EDN: PQBODF.

3. СП 485.1311500.2020 СППЗ. Установки пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. URL: https://www.docs.cntd.ru/document/573004280(дата обращения: 29.05.2021).

4. СП 484.1311500.2020 СППЗ. Системы пожарной сигнализации и автоматизация систем противопожарной защиты. Нормы и правила проектирования // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. URL: https://www.docs.cntd.ru/document/566249686(дата обращения: 20.12.2021).

5. СП 5.13130.2009. Системы противопожарной защиты. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования (с изменением № 1) // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. URL: https://www.docs.cntd.ru/document/1200071148 (дата обращения: 24.02.2022).

6. Быстров В.И., Сагдеев К.М. Анализ существующих технических решений по созданию интегрированной системы безопасности предприятия // Студенческая наука для развития информационного общества. – 2015. – С. 150-151. – EDN: UEEUAL.

7. Круглов В.В., Дли М.И., Голунов Р.Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. – 2001.

8. Блюмин С.Л. и др. Нечеткая логика: алгебраические основы и приложения //Липецк: ЛЭГИ. – 2002.

9. Boltyonkova E., Andreev A., Doronin A. Development of measures to ensure information security in structural division of the university // E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2019. – Т. 140. – P. 08005. EDN: GUJJQV.

10. ГОСТ Р 53325-2012. Техника пожарная. Технические средства пожарной автоматики. Общие технические требования и методы испытаний (с изменениями № 1-3)// Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. URL: https://www.docs.cntd.ru/document/1200102066?section=text (дата обращения: 15.02.2022).

11. ГОСТ Р 57552-2017. Техника пожарная. Извещатели пожарные мультикритериальные. Общие технические требования и методы испытаний // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200146338?section=text(дата обращения: 20.01.2022).

12. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: Федер. закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ (в ред. от 30 апр. 2021 г.). Доступ из с прав.-правовой системы "КонсультантПлюс".

13. Андреев, А.В. Подход к определению техносферной безопасности / А.В. Андреев, А.С. Доронин, В.Д. Каченкова // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2022. – № 3(63). – С. 86-94. – EDN: FYBYVV.

14. Каченкова, В.Д. Сравнение терминов в области безопасности России и Китая / В.Д. Каченкова, А.В. Андреев // Безопасность в профессиональной деятельности : сборник научных статей, Санкт-Петербург, 31 марта 2021 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный экономический университет, 2021. – С. 147-154. – EDN: AGIKBU.

15. Использование геоинформационных систем для своевременного предупреждения пожаров / А.В. Андреев, В.Г. Бурлов, А.И. Шершнева, С.А. Шавуров // Региональная информатика (РИ-2020): XVII Санкт-Петербургская международная конференция. Материалы конференции, Санкт-Петербург, 28-30 октября 2020 года. Том Часть 2. – Санкт-Петербург: Региональная общественная организация "Санкт-Петербургское Общество информатики, вычислительной техники, систем связи и управления", 2020. – С. 226-227. – EDN: HFGFIW.

16. Доронин, А.С. Усовершенствование математической модели угроз безопасности информации в информационной системе / А.С. Доронин, А.В. Андреев // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 19-24 ноября 2018 года / Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2018. – С. 104-107. – EDN: YXWMHZ.

17. Полехин П.В., Козлов А.А., Чебуханов М.А., Матюшин Ю.А., Фирсов А.Г., Сибирко В.И., Чечетина Т.А., Гончаренко В.С. // Пожары и пожарная безопасность в 2017 году: статистический сборник. М.: ВНИИПО, 2018. – 125 с.

18. Полехин П.В., Чебуханов М.А., Долаков Т.Б., Козлов А.А., Матюшин Ю.А., Фирсов А.Г., Сибирко В.И., Гончаренко В.С., Чечетина Т.А. // Пожары и пожарная безопасность в 2018 году: статистический сборник. Под общей редакцией Гордиенко Д.М. М.: ВНИИПО, 2019. – 125 с.

19. Полехин П.В, Чебуханов М.А., Долаков Т.Б., Козлов А.А., Матюшин Ю.А., Фирсов А.Г., Сибирко В.И., Гончаренко В.С., Чечетина Т.А. // Пожары и пожарная безопасность в 2019 году: статистический сборник. Под общей редакцией Гордиенко Д.М. М.: ВНИИПО, 2020. – 80 с.

20. Полехин П.В., Чебуханов М.А., Козлов А.А., Фирсов А.Г., Сибирко В.И., Гончаренко В.С., Чечетина Т.А. // Пожары и пожарная безопасность в 2020 году: статистический сборник. Под общей редакцией Гордиенко Д.М. М.: ВНИИПО, 2021. – 112 с.

21. Имитационное моделирование пожарных ситуаций в зданиях / М.О. Авдеева, В.А. Лушкина, Ю.Д. Кузнецов, К.И. Заглядимов. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2022. – 71 с. – ISBN 978-5-7422-7907-5. – DOI 10.18720/SPBPU/2/id22-246. – EDN: BVSUPG.

22. Андреев, А.В. Методика балльно-факторной оценки частоты инициирующих пожароопасные ситуации событий для подземных емкостей автомобильной газозаправочной станции / А.В. Андреев, А.П. Бызов, П.С. Орловский // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2023. – № 4(68). – С. 131-141. – EDN: COMZEM.

*Статья поступила в редакцию 20.05.2024*
*Статья принята к публикации 17.06.2024*

УДК 628.16
EDN: TEMICV

# РАЗРАБОТКА КАРТРИДЖА ДЛЯ БЫТОВОГО ФИЛЬТРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАНУЛИРОВАННОГО СОРБЕНТА ОКСИД ГРАФЕНА-ХИТОЗАН

© Автор(ы) 2024

SPIN: 6654-8702
AuthorID: 1125153
ORCID: 0000-0002-1388-8649
ScopusID: 57678978900

**ЧЕЛЫШЕВА Валентина Павловна**, аспирант
*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*
*(195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, e-mail: chelysheva.vp@edu.spbstu.ru)*

SPIN: 9964-2034
AuthorID: 439213
ORCID: 0000-0002-5914-6210
ResearcherID: AAR-7575-2020
ScopusID: 57220085642

**ПОЛИТАЕВА Наталья Анатольевна**, доктор технических наук, профессор,
профессор высшей школы гидротехнического и энергетического строительства
*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*
*(195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, e-mail: politaevana1971@gmail.com)*

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: 6516-2037
AuthorID: 478195
ORCID: 0000-0002-9520-4094
ResearcherID: AAE-9510-2019

**ЕФРЕМОВА Сания 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)*

**Аннотация.** Сорбционная очистка воды с помощью фильтр-кувшина является эффективным способом очистки питьевой воды и ее доочистки от различных загрязнителей, таких как хлор, органические соединения, тяжелые металлы и другие вредные вещества. Фильтр-кувшин основан на принципе сорбции, при котором загрязнители улавливаются на поверхности или внутри материала фильтра. Преимущества фильтр-кувшинов заключаются в простоте использования, доступности, экономичности и возможности очистки воды прямо перед ее употреблением. Однако, для эффективной работы фильтра необходимо регулярно менять картриджи и следить за их состоянием, что влияет на увеличение количества используемого пластика и экономических затрат потребителей. В данной работе рассмотрены существующие модели картриджи фильтров, их положительные и отрицательные качества. Предложен новый модернизированный картридж для очистки воды не только в бытовых условиях, но и походных с использованием пластиковой бутылки. Основной новизной данного картриджа является способность сменять сорбент в результате его использования. Модель данного картриджа показала хорошую проводимость и небольшое отклонение от лабораторных исследований сорбционных свойств материала оксид графена-хитозан.

**Ключевые слова:** очистка воды, картридж, бытовой фильтр, сорбенты, оксид графена, хитозан.

# DEVELOPMENT OF A CARTRIDGE FOR HOUSEHOLD FILTER USING GRAPHENE OXIDE-CHITOSAN GRANULAR SORBENT

© The Author(s) 2024

**CHELYSHEVA Valentina Pavlovna**, graduate student
*Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University*
*(195251, Russia, St. Petersburg, Polytechnicheskaya St., 29, e-mail: chelysheva.vp@edu.spbstu.ru)*

**POLITAYEVA Natalya Anatolyevna**, doctor of technical sciences,

professor of the Higher School of Hydraulic and Energy Construction
*Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University*
*(195251, Russia, St. Petersburg, Polytechnicheskaya St., 29, e-mail: politaevana1971@gmail.com)*
**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)*
**EFREMOVA Sania Yunusovna**, professor, doctor of biological sciences,
professor of the Department of Biotechnology and Technosphere Safety
*Penza State Technological University*
*(440039, Russia, Penza, Baidukova proezd/Gagarin st., 1a/11 e-mail: s_sharkova@mail.ru)*

**Abstract.** Sorptive water purification using a filter jug is an effective way to purify drinking water and purify it from various pollutants, such as chlorine, organic compounds, heavy metals and other harmful substances. The pitcher filter is based on the principle of sorption, in which pollutants are trapped on the surface or inside the filter material. The advantages of filter jugs are ease of use, availability, cost-effectiveness, and the ability to purify water right before use. However, for the filter to work effectively, it is necessary to regularly change cartridges and monitor their condition, which increases the amount of plastic used and the economic costs of consumers. This paper examines existing models of filter cartridges, their positive and negative qualities. A new modernized cartridge has been proposed for water purification not only in domestic conditions, but also in camping conditions using a plastic bottle. The main novelty of this cartridge is the ability to change the sorbent because of its use. The model of this cartridge showed good conductivity and a slight deviation from laboratory studies of the sorption properties of the graphene oxide-chitosan material.

**Keywords**: water purification, cartridge, household filter, sorbents, graphene oxide, chitosan.

***Для цитирования:*** *Челышева В.П. Разработка картриджа для бытового фильтра с использованием гранулированного сорбента оксид графена-хитозан/ В.П. Челышева, Н.А. Политаева, Л.М. Молодкина, С.Ю. Ефремова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 2(66). – С. 268-273. – EDN: TEMICV.*

**Введение.** На нашей планете 1400 млн км³ воды, при этом пресная вода составляет только 2,3 тыс. км³, данное небольшое количество воды используется как в промышленности, так и для бытового употребления [1]. Именно поэтому проблема очистки воды во всем мире является одной из первостепенных зада, требующих эффективного решения. В настоящий момент существует большое количество способов и методов очистки воды, однако не все из них соответствуют необходимому уровню безопасности, эффективности, экономичности и экологичности.

На данный момент самыми основными и опасными загрязнителями воды в мире считаются тяжелые металлы. железо, нефтепродукты, они негативно влияют практически на все органы и системы органов человека [2-4]. Кроме того, в водопроводной воде могут содержаться одни из наиболее серьёзных загрязнителей – соли жёсткости. Избыточное содержание солей жёсткости в воде может привести к негативным последствиям при её использовании в процессе питьевого потребления. Чтобы имеющуюся воду можно было безопасно употреблять в качестве питья, стоит проводить вторичную очистку в домашних условиях, непосредственно перед употреблением. Вторичная очистка воды крайне необходима, особенно для жителей старых районов в городах, так как водопроводные системы в тех местах, чаще всего, не демонтируются, из-за чего трубы покрываются коррозией. Ржавление негативно влияет на организм, потому что в случае употребления ржавой воды происходит накопление металлов в организме, что чревато различными заболеваниями (при избыточном накоплении меди в организме наблюдается деградация тканей печени, почек и мозга, а также это приводит к остановке роста и падению гемоглобина) [5]. Собственно, чтобы обезопасить организм от такого воздействия можно использовать бытовые фильтры для вторичной очистки воды.

Камнем преткновения в любой разработке всегда является вопрос экологичности. Если говорить про бытовые фильтры, то основной проблемой является именно картридж с сорбентом, который необходимо утилизировать по истечении его срока годности (4-6 месяцев). То есть, по минимальным подсчётам, за свою жизнь человек, использующий бытовой фильтр, выбрасывает около 140 пластиковых картриджей, а как известно, пластик разлагается не быстро (минимум 100-200 лет), в процессе своего разложения пластик выделяет метан, который усугубляет глобальное потепление, так как является парниковым газом. То есть, выброшенный пластик не только загрязняет планету, но и способствует глобальному потеплению. На данный момент, 90% "Великого тихоокеанского мусорного участка" составляет именно пластик. Даже по одному этому факту можно оценить масштаб проблемы [6].

Разберем еще один немаловажный аспект – экономический. Нередко, люди продолжают использовать картриджи с истёкшим сроком годности.

Причина чаще всего кроется в стоимости нового картриджа. За цену, представленную в розничных магазинах, картридж служит достаточно недолго.

Существует ещё одна проблема, которая создаёт неудобства, как физические, так и экономические. Проблема компактности фильтра или картриджа для него. Об этом аспекте мало кто задумывается, но именно это позволило бы в путешествиях не тратить огромное количество денег на бутилированную воду и решить важный вопрос поиска воды в местах, где нет магазинов и перевалочных пунктов.

В статье мы предложим вариант конструкции картриджа для домашнего фильтра, который позволит решить все проблемы, перечисленные выше.

Для удаления широкого спектра загрязнителей из водопроводной воды в домашних условиях используют различные фильтровальные установки. На данный момент существует большое разнообразие фильтров для воды с различными конструкциями и принципами работы. Однако, одними из наиболее распространённых бытовых фильтров являются фильтры-кувшины.

Для разработки новой модели картриджа был проведен патентный поиск существующих разработок в указанной области. Таким образом были выявлены достоинства и недостатки существующих моделей. Так, например бытовой фильтр для тонкой очистки воды [7], содержащий корпус, закрытый крышками, имеющий шланг для отвода отфильтрованной воды, а также расположенные между корпусом и крышкой предфильтра. Эффект тонкой очистки воды достигается с помощью фильтроэлемента. Он представляет собой фильтрующий материал на основе ядерной мембраны. Мембрана является тонкой плёнкой из полиэтилентерефталата, в которой проделаны поры путём бомбардировки ионами инертных газов с последующей физико-химической обработкой, чтобы достигнуть необходимого диаметра.

Недостатком данного фильтра является то, что необходимо несколько емкостей, а именно для неочищенной воды и отфильтрованной. Кроме того, в фильтре предусмотрен переход подачи отфильтрованной воды в покапельный режим, что увеличивает время фильтрации воды, а мембрана требует промывки, что приведет к снижению производительности.

Следующим рассматриваемым изобретением является фильтр-патрон [8]. Фильтровальный патрон вставляется в кувшин. В свою очередь он состоит из узла крепления в фильтре, который соединяется с узлом фильтрации, сделанным в виде оболочки. Оболочка в свою очередь наполнена смесью адсорбирующих элементов. Обязательным элементом является узел подачи очищаемой воды, выполненный в виде конусообразной оболочки с радиальными полосами. Адсорбирующий компонент указанного фильтра сформирован из смеси микропористых частиц активированного угля, а некоторые из частиц покрыты серебром.

Недостатки эксплуатации заключаются в простоте конструкции фильтровального патрона. Он удобен в эксплуатации и обеспечивает эффективную очистку воды от солей металлов и органических соединений, однако не позволяет удалять бактерии и вирусы, наличие которых характерно для водопроводной воды, которая не прошла предварительную подготовку для питьевых целей.

Рассмотрим ещё одну разработку – бытовой мембранный фильтр с двухступенчатой очисткой воды самотёком [9]. Состоит данный фильтр из неразборного мембранного элемента в виде спирали, ограниченной двумя крышками, а внутри заполнен сорбентом. Сорбентом в свою очередь является активированный уголь, содержащий серебро с ионообменными смолами. Фильтр достаточно габаритен, не более 68/135, а поток очищенной воды составляет не менее 3 л/час. Отрицательными сторонами данной конструкции является необходимость в ёмкостях для неочищенной и очищенной воды, которые должны будут соединяться отводной трубкой.

В статье А.П. Андрианова [10] «Доочистка водопроводной воды. Применение мембранных технологий» демонстрируется актуальность бытового фильтра с фильтрующей частью – мембраной. Отмечается, что мембраны обеспечивают обеззараживающий эффект за счёт механической задержки бактерий и химических соединений через поры диаметром 0,05-0,1 мкм, однако оптимальной стерильности достигнуть невозможно за счёт повторного размножения неблагоприятной микрофлоры с обратной стороны мембранного элемента, а также в шлангах и на уплотнителях корпусов. Однако существуют наномембранные фильтры, как пишет автор, в которых диаметр пор несколько шире, что позволяет также задерживать патогенных микроорганизмов, но сохранять адекватное солесодержание воды, что делает её лучше для питьевого назначения. Также недостатком описываемого мембранного фильтра является невысокая доступность. Это сложная дорогостоящая система, устанавливаемая на систему водоснабжения в доме или квартире, в отличие от удобного фильтра-кувшина.

В статье «Эффект доочистки питьевой воды методом озонирования и неполного замораживания» Л.Ф. Королёвой и Н.В. Чередниченко [11] рассмотрена эффективность совместной обработки питьевой воды сорбцией на угольном фильтре, озоном и замораживанием для снижения содержания опасных макро- и микроэлементов. При озонировании происходит окисление элементов с переменной валентностью, что способствует более полной адсорбции на активированном угле в последующем. После, при медленном замораживании, многие элементы остаются в жидкой фазе. Причем порядок должен быть именно таким, что сначала воду озонируют, затем замораживают. Обратное действие

нецелесообразно, так как остаются активные кислородные комплексы, а также талая вода считается более полезной для живого организма. Способ такой доочистки является экспериментальным и трудно выполнимым по причине сложности сохранения и подачи в водоснабжение талой воды.

Важно также подобрать сорбционный материал. Который будет использован в фильтре для очистки воды. Одним из самых эффективных способов на данный момент считается доочистка воды с помощью фильтров на основе углей, а именно графена [12-14]. Данный материал широко применяется в сорбционной очистке воды, так как воздействует на более широкий спектр загрязнителей [15-18]. Известно его использование в качестве сорбционного материала для очистки промышленных стоков [19-20], многоступенчатых фильтров [21], а также в картриджах для доочистки воды.

**Методология.** В ходе работы над усовершенствованием картриджа бытового фильтра была разработана конструкция корпуса, который устанавливается в графин фильтра. А также была разработана конструкция самой крышки картриджа со специальным отверстием для горлышка бутылки, что позволяет использовать картридж самостоятельно, в походных условиях. В программах *Компас 3д* и *Autodesk Fusion 360* начерчены чертежи разработки (рис. 1). Размеры подобраны под стандартный корпус фильтр-кувшина на 2,5 л и указаны на чертеже в миллиметрах.

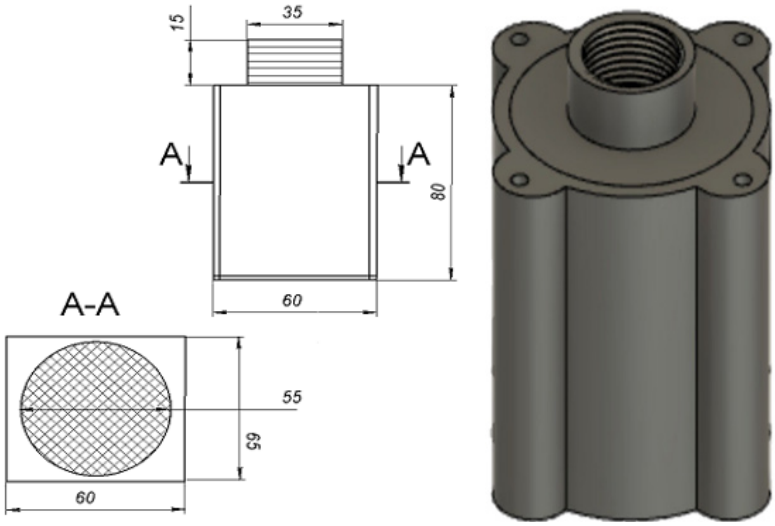



*Рисунок 1 – Чертежи картриджа в программах Компас 3д и Autodesk Fusion 360 соответственно*

*Методика определения меди в воде.* Исследование проводили согласно «Методики определения меди (II) фотоэлектроколориметрически по окраске ее аммиачного комплекса» [22] на спектрофотометре КФК-3. Подготовленный раствор двухвалентной меди проливали через фильтр в соотношении 4 гр. сорбента к 200 мл раствора меди. Эффективность очистки воды сорбционным материалом хитозан-оксид графена рассчитывалась по

формуле 1.

$$Э=(C_0 - C_к)/C_к * 100\%, \quad (1)$$

где $C_0$ – начальная концентрация загрязненной воды, мг/дм$^3$; $С_к$ – конечная концентрация очищенной воды, мг/дм$^3$; Э – эффективности очитки воды, %.

**Результаты.** Изготовлена работающая модель картриджа на лазерном станке с помощью наслоения деталей из полиметилметакрилата и прослоек из этиленвинилацетата (ЭВА). Сам корпус, состоящий из 12 пластин размером 4 мм в высоту и прослоек размером около 2-3 мм, закреплен с четырех сторон на металлических шпильках диаметром 3 мм и длинной около 11 см. Внизу корпуса закреплена металлическая сетка размером 6х6,5 см и шестигранных гаек. Модель крышки для фильтра выполнена из подручных материалов для бутылки объемом 0,5 л. Результаты работы представлены на рисунке 2.

Для очистки воды использовался сорбционный материал – гранулированный сорбент оксид графена-хитозан.

Предварительная сорбционная очистка раствора двухвалентной меди данным СМ составляла 99% [23].

Эффективность очистки моделью картриджа и сорбентом оксид графена-хитозан определяли на смоделированном растворе двухвалентной меди с помощью фотометра КФК-3.

Результаты испытаний представлены в таблице 1.

*Таблица 1 – Результаты испытания картриджа с СМ (оксид графена-хитозан)*

| № | Название испытуемого объекта | $С_{нач}$, мг/мл (50мл) | $С_{кон}$, мг/мл (50мл) | Эффективность очистки, % |
|---|---|---|---|---|
| 1 | СМ оксид графена-хитозан | 0,07 | 0,001 | 99 |
| 2 | Картридж с СМ | 0,07 | 0,009 | 87 |



*Рисунок 2 – Модель бытового фильтра в масштабе 1:1*

**Обсуждение.** В ходе испытаний картридж, содержащий сорбент оксид графена-хитозан показал высокую эффективность очистки воды. Для проверки эффективности использовали соотношение 4 гр. сорбента на 200 мл очищаемой воды. Эффективность очистки воды с использованием картриджа для бытовой очистки, загруженного сорбентом оксид графена-хитозан, от двухвалентной меди составила 87%.

Предполагается, что снижение эффективности очистки произошло из-за не экологичных материалов крышки фильтра (клея) и металлических креплений, которые было необходимо закрепить к кувшину. Данные проблемы планируется устранить в дальнейшем, путем изготовления модели фильтра на *3D* принтере. Тем не менее, данная модель фильтра отличается своей экономичностью и практичностью, что значительно уменьшит затраты на эксплуатацию бытовых фильтров, а также позволит использовать их в походных условиях.

**Выводы.** Таким образом, в процессе проделанной работы была выполнена работающая модель картриджа для бытового фильтра с сорбционной загрузкой. В качестве сорбционного материала использовали ранее разработанный сорбент на основе хитозана, декорированного оксидом графена, который уже показал высокую сорбционную способность к ионам тяжелых металлов. Работоспособность модели была проверена с помощью раствора меди в воде методом спектрофотомерии. Эффективность очистки выявили при сравнении отработанной воды после сорбционной очистки и с использованием фильтра. Показано, что при пропускании через фильтр эффективность очистки незначительно снижается, что предположительно обусловлено использованием склеивающих материалов для самой модели.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Ларионов, В.Г. Современное состояние мировых водных ресурсов и основные направления по увеличению их доступности / В.Г. Ларионов, Е.Н. Шереметьева // Известия Иркутской государственной экономической академии. – 2015. – № 4. – С. 590-596.

2. Chizitere, E. Recent advances in nano-adsorbents for the sequestration of copper from water [Text] / E. Chizitere, E. Adewale, G. Adeniyib, Patric E. Omukua, K. Chidiebere O. Kingsley, O. Iwuozora // Journal of Water Process Engineering. – 2022. – P. 47.

3. Anatoly, V.S. Intestinal microbiota as a mediator of the essential and toxic effects of zinc in the intestinal and other tissues / V.S. Anatoly, M. Aschner, Xin Gen Lei, V.A. Gritsenko et al. // Gut Microbiota as a Mediator of Essential and Toxic Effects of Zinc in the Intestines and Other Tissues. – 2021. – № 22. – P. 16.

4. Gulshan, K.S. Evaluating the geochemistry of groundwater contamination with iron and manganese and probabilistic human health risk assessment in endemic areas of the world's largest River Island / K.S. Gulshan, J.P. Kumar, Y.P. Kumar. et al. // Environmental Toxicology and Pharmacology. – 2021. – P. 87.

5. Зинина, О.Т. Влияние тяжёлых металлов на биохимические процессы в организме человека / О.Т. Зинина – Хабаровск: Избранные вопросы судебно-медицинской экспертизы. – 2001. – С. 99.

6. Соколов, Ю.И. Риски тотального пластикового загрязнения планеты / Ю.И. Соколов // Проблемы анализа риска. – 2020. – № 3 – С. 30-43.

7. Пат. 2145943 Российская Федерация, МПК B01D 29/56 Бытовой фильтр для тонкой очистки воды [Электронный ресурс] / Емельянова Л.П., Мельников А.И., Савин Н.А., Соляник Р.С.; заявитель и патентообладатель Научно-производственное предприятие «Симплэкс» (UA). – № 94010702/12; заявл. 28.03.1994; опубл. 27.02.2000, Бюл. №6. URL: https://www1.fips.ru/iiss/document.xhtml?faces-redirect=true&id=efbbbe22f258fae54625fc6999a294ab [Дата обращения: 02.02.2024].

8. Пат. 2472567 Российская Федерация, МПК B01D 27/14 Фильтровальный патрон бытового фильтра для очистки питьевой воды [Электронный ресурс] / Ганиев К.Ж., Захаров С.В., Маслюков А.П., Маслюков В.А., Мельников И.О., Николотов В.В., Растегаев А.Г., Сапрыкин В.В.; заявитель и патентообладатель Закрытое Акционерное Общество "МЕТТЭМ-Технологии" (RU). – № 2011133163/05; заявл. 08.08.2011, опубл. 20.01.2013, Бюл. №2. URL: https://www1.fips.ru/iiss/document.xhtml?faces-redirect=true&id=2f870e41d2d7400cb15b620edb8fe196 [Дата обращения: 02.02.2024].

9. Пат. 10744 Российская Федерация, МПК B01D 1/10 Бытовой мембранный фильтр для очистки питьевой воды самотёком [Электронный ресурс] / Головков В.М.; заявитель и патентообладатель НИИ ядерной физики при Томском политехническом университете – № 99101214/20; заявл. 19.01.1999, опубл. 19.01.1999. URL: https://www1.fips.ru/iiss/document.xhtml?faces-redirect=true&id=b2532df770d1dd538e504e2d2b7b64af [Дата обращения: 02.02.2024].

10. Андрианов, А.П. Условия безопасного применения бытовых систем доочистки питьевой воды / А.П. Андрианов, М.Г. Журба // Питьевая вода. – 2009. – №6 (54). – С. 2-18.

11. Королева, Л.Ф. Эффект доочистки питьевой воды методом озонирования и неполного замораживания / Л.Ф. Королева, Н.В. Чередниченко, Д.В. Киселева, М.Г. Первова // Химия в интересах устойчивого развития. – 2009. – Т. 17. – № 1. – С. 29-34.

12. Шумяцкий Ю.И. Адсорбционные процессы: учебное пособие / Ю.И. Шумяцкий //М.: Изд-во РХТУ им. Менделеева. – 2005. – 164 с.

13. Летичевская Н.Н. 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. – С. 177-179.

14. Chengcheng Shen, Sewage sludge derived FeCl3-activated biochars as efficient adsorbents for the treatment of toxic As(III) and Cr(VI) wastewater / Chengcheng Shen, Li Gu, Sihao Chen, Yajuan Jiang, Peng Huang, Heng Li, Huayang Yu, Dong Xia // Journal of Environmental Chemical Engineering. – Volume 10. – Issue 6. – December 2022. – P. 13 https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108575.

15. Алексеева, О.К. Углеродные нанотрубки на защите водных ресурсов / О.К. Алексеева // ПерсТ. – 2010. – Т. 17. – В.10 – С. 5.

16. O'Hern, S.C. Selective ionic transport through tunable subnanometer pores in singllayer graphene membranes / S. C O'Hern, M. S. Boutilier, J. C. Idrobo, Y. Song, J. Kong, T. Laoui, M. Atieh, R. Karnik // Nano Lett. – 2014. – №14 – P. 1234-1241.

17. Nair, R.R. Unimpeded permeation of water through helium–leak–tight graphene–based membranes / R.R. Nair, H.A. Wu, P.N. Jayaram, I.V. Grigorieva, A.K. Geim // Science. – 2012. – V. 335. – P. 442-444.

18. Joshi, R.K. Membranes precise and ultrafast molecular sieving through graphene oxide / R.K. Joshi, P. Carbone, F.C. Wang, V.G. Kravets, Y. Su, I.V. Grigorieva, H.A. Wu, A.K. Geim, R.R. Nair // Science 2014. – V. 343. – P. 752-754.

19. Zenqqiang ZhangKhajeh, M. Fe3o4/Graphene oxide composite for adsorption of methylene blue and methyl orange in water treatment / M. Khajeh, A. Barkhordar // Журнал прикладной спектроскопии. – 2020. – № 4. – Т. 87 – С. 646-652.

20. Terzopoulou, Z. Recent Advances in Nanocomposite Materials of Graphene Derivatives with Polysaccharides / Z. Terzopoulou et al. // Materials V. – №8. – 2015. – P. 652-683.

21. Ульянова, П.В. Эффективность очистки воды с помощью бытовых фильтров и сорбентов по перманганатному индексу / П.В. Ульянова, К.А. Щербакова // Материалы международного научного форума обучающихся "Молодежь в науке и творчестве" : Сборник научных статей, Гжель, 27 апреля 2016 года – 2017 года / Гжельский государственный университет. – Гжель: Гжельский государственный университет, 2016. – С. 642-645.

22. Иванов А.Р. Физико-химические методы анализа в экологическом мониторинге воды и почвы: учебное пособие / А.Р. Иванов // ВШТЭ. – СПбГУПТД. – СПб. – 2019. – Часть 2. – С. 113.

23. Политаева, Н.А. Сорбционный материал на основе хитозана, декорированный оксидом графена, для очистки сточных вод от катионов меди / Н.А. Политаева, В.П. Челышева, А.Ф.Ф.Х. Абдулхуссэйн // Экология и промышленность России. – 2022. – Т. 26. – № 8. – С. 22-27. – DOI 10.18412/1816-0395-2022-8-22-27. – EDN UMLOGF.

*Статья поступила в редакцию 22.05.2024*
*Статья принята к публикации 17.06.2024*