

XXI век : ИТОГИ ПРОШЛОГО И ПРОБЛЕМЫ НАСТОЯЩЕГО *плюс*



2024
№1(65) т.13

технические науки



XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего *плюс*

Учредитель – ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет»

Главный редактор

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

Заместители главного редактора:

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

Редакционная коллегия:

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

Основан в 2011 г.

18+

Том 13
№ 1 (65)
2024

Журнал выходит
4 раза в год

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

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

Компьютерная верстка:
В.В. Зупарова

Технический редактор:
В.В. Зупарова

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

Подписано в печать 19.03.2024.

Выход в свет 27.03.2024.

Формат 60X84 1/8

Печать ризография.

Усл. печ. л. 26,2.

Тираж 100 экз. Заказ № 105.

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

СВЕДЕНИЯ О ЧЛЕНАХ РЕДКОЛЛЕГИИ

Главный редактор

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

Заместители главного редактора:

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

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

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

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

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

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

Пашенко Дмитрий Владимирович, доктор технических наук, профессор, ректор

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

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

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

Чулков Валерий Александрович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Биомедицинская инженерия»

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

Редакционная коллегия:

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

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

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

Давыденко Наталия Ивановна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технология и организация общественного питания», начальник отдела подготовки научных кадров

(Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Россия)

Дмитриев Михаил Сергеевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры автомобильного транспорта, информационных технологий и методики обучения техническим дисциплинам

(Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет)

Зинкин Сергей Александрович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Вычислительная техника» (Пензенский государственный университет, г. Пенза, Россия)

Зыбина Ольга Александровна, доктор технических наук, доцент, заместитель начальника по научной работе (Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, г. Санкт-Петербург, Россия)

Ивашенко 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)

Фатыхов Юрий Адгамович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Пищевых и холодильных машин» (Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия)

Шалагин Сергей Викторович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Компьютерные системы» (Казанский Национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева, г. Казань, Россия)

Ципенко Антон Владимирович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры 801 (Московский авиационный институт, г. Москва, Россия)

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

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ, ОСНОВАННЫХ НА ТЕОРИИ *RETINEX*, ПРИ
ОБРАБОТКЕ ЦВЕТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ В ШАХТАХ**

Зайцева Екатерина Викторовна, Кочнева Алина Александровна,
Катунцов Евгений Владимирович, Ромакина Оксана Михайловна.....10

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИМИТАЦИИ КАРДИОСИГНАЛОВ В УЧЕБНОМ РОБОТЕ-ТРЕНАЖЕРЕ

Чулков Валерий Александрович, Сержантова Наталья Александровна.....18

**ТЕХНОЛОГИИ ИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
КАК ИНСТРУМЕНТ ЦИФРОВИЗАЦИИ СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ**

Гусарова Алла Александровна.....25

**УПРАВЛЕНИЕ ПРОФИЛАКТИЧЕСКИМИ РАБОТАМИ ПО ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ
ПОЖАРОВ АВТОМОБИЛЕЙ НА АВТОТРАНСПОРТНОМ ПРЕДПРИЯТИИ**

Моторыгин Юрий Дмитриевич, Литовченко Ирина Олеговна, Топилкин Павел Сергеевич.....35

**ПРОГРАММНОЕ ЯДРО МИКРОПРОЦЕССОРА *RISC* АРХИТЕКТУРЫ
НА БАЗЕ ПРОГРАММИРУЕМОЙ ЛОГИЧЕСКОЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ СХЕМЫ**

Кольчугина Елена Анатольевна, Мартышкин Алексей Иванович,
Пащенко Дмитрий Владимирович, Трокоз Дмитрий Анатольевич.....42

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ
РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ**

Шуршев Тимофей Валерьевич, Хоменко Татьяна Владимировна.....50

**СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПО УЛУЧШЕНИЮ
РАЗРЕШЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДОРОЖНОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

Журавлев Александр Александрович.....58

ПОДХОДЫ К ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ГОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Зайцева Екатерина Викторовна, Кочнева Алина Александровна,
Катунцов Евгений Владимирович, Киба Мария Романовна.....62

**МЕТОДИКА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ
РУПОРНОЙ АНТЕННЫ ВО ВЗВЕШЕННЫЙ ГРАФ**

Мерзляков Юрий Владимирович, Пащенко Дмитрий Владимирович.....68

ПИЩЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**ВЛИЯНИЕ ХРАНЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ КАЧЕСТВА ЯГОД
КРЫЖОВНИКА (*RIBES UVA-CRISPA* L.)**

Голуб Ольга Валентиновна, Мотовилова Наталья Владимировна,
Чекрыга Галина Петровна, Петрук Вера Александровна.....75

**СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ПРИ ОБРАБОТКЕ СЕМЯН
ПШЕНИЦЫ НИЗКИМИ ДОЗАМИ γ -ИЗЛУЧЕНИЯ**

Тимакова Роза Темерьяновна, Ильяхин Руслан Васильевич.....83

**ВЛИЯНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОВОЩНЫХ КУЛЬТУР НА ПРОЦЕССЫ
ХРАНЕНИЯ И ПЕРЕРАБОТКИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО СЫРЬЯ**

Школьников Марина Николаевна, Аббазова Венера Нагимовна.....90

ВЛИЯНИЯ МЕТОДОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ОРГАНОЛЕПТИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ МЯСА БАРАНИНЫ

Чугунова Ольга Викторовна, Степнева Екатерина Витальевна,
Крюкова Екатерина Владимировна, Кокорева Лариса Анатольевна.....96

ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ БЕЛКА И АМИНОКИСЛОТНОГО СОСТАВА СУБПРОДУКТОВ СВИНЕЙ ПОРОДЫ «КРУПНАЯ БЕЛАЯ»

Разумовская Елена Сергеевна, Миленцева Ирина Сергеевна, Неверова Ольга Александровна.....103

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СРЕДЫ В ПОКАЗАТЕЛИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО РИСКА НА ПРЕДПРИЯТИЯХ**

Борисова Анастасия Викторовна, Баланова Марина Васильевна,
Козлюк Виталий Викторович, Чубарь Евгения Петровна.....108

ИССЛЕДОВАНИЕ СМАЧИВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПОВЕРХНОСТНО АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ РЕСПИРАБЕЛЬНОЙ ФРАКЦИИ ПЫЛИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ МАССОВЫХ ВЗРЫВОВ

Коршунов Геннадий Иванович, Каримов Артур Маратович.....113

УТИЛИЗАЦИЯ ВЫСШИХ ВОДНЫХ РАСТЕНИЙ С ЦЕЛЬЮ ПОЛУЧЕНИЯ БИОГАЗА

Политаева Наталья Анатольевна, Вельможина Ксения Алексеевна,
Шинкевич Полина Сергеевна, Бондаренко Кристина Александровна, Ефремова Сания Юнусовна.....119

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ОСТАТКОВ КАТОДА ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ ПОСЛЕ ТЕПЛОВОГО РАЗГОНА ПРИ ЭКСПЕРТИЗЕ ПОЖАРОВ

Мокряк Анна Васильевна, Мельник Антон Анатольевич.....127

ЭКСПЕРТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ОКАЗЫВАЮЩИХ НАИБОЛЬШЕЕ ВЛИЯНИЕ НА БЕЗОПАСНОСТЬ ТРУДА В ПУТЕВОМ КОМПЛЕКСЕ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Навценя Владимир Юрьевич, Нарусова Елена Юрьевна, Королева Анна Михайловна.....135

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА СУДНА

Наумов Виктор Степанович, Кочнева Ирина Борисовна.....140

ПОВЫШЕНИЕ МЕР БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ РАБОТ НА НЕУСТОЙЧИВЫХ ДЕРЕВЯННЫХ ОПОРАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИСТАВНЫХ ЛЕСТНИЦ

Сенченко Владимир Александрович, Каверзнева Татьяна Тимофеевна,
Фетисов Александр Георгиевич, Мессинева Екатерина Михайловна.....145

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ РАННЕГО ОБНАРУЖЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Богданов Андрей Владимирович, Сулейманов Игорь Эдуардович.....152

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ НЕЙТРАЛИЗАТОРА ТОКСИЧНЫХ КОМПОНЕНТОВ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ОКИСЛОВ АЗОТА В ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ

Баландина Ольга Александровна.....157

АНАЛИЗ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО РИСКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ШУМА И ВИБРАЦИИ НА РАБОТНИКОВ НЕФТЯНЫХ ШАХТ

Мяков Владислав Владимирович, Коршунов Геннадий Иванович.....164

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТИПА ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ ЭЛЕКТРОВЕЛОСИПЕДА ПОСЛЕ ПОЖАРА

Мокряк Анна Васильевна, Парийская Анна Юрьевна.....170

МОДЕЛЬ АВАРИЙНОЙ УТЕЧКИ ВОДОРОДСОДЕРЖАЩЕГО ГАЗА В ВЕНТИЛИРУЕМОМ ПОМЕЩЕНИИ В ПРОГРАММНОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ <i>FIRE DYNAMICS SIMULATOR (FDS)</i> Тимошенко Артем Леонидович, Самигуллин Гафур Халафович, Булатов Вячеслав Олегович.....	176
ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВ СНИЖЕНИЯ НЕГАТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ПРИ ПЕРЕХОДЕ НА НАИЛУЧШИЕ ДОСТУПНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ Кондратьева Ольга Евгеньевна, Локтионов Олег Александрович, Боровкова Анастасия Михайловна, Звонкова Наталья Владимировна.....	188
НЕПРЕРЫВНЫЙ КОНТРОЛЬ НЕФТЕПРОДУКТОВ В СТОКАХ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ТЭЦ Баденко Владимир Львович, Молодкина Людмила Михайловна, Тарасевский Филипп Георгиевич.....	198
ОЦЕНКА СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ РИСКОВ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА РАБОТНИКОВ ХОЗЯЙСТВА ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ Чаплыгин Владимир Сергеевич.....	206
МЕТОДИКА РАСЧЕТА КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ОПАСНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ Борисова Анастасия Викторовна, Баланова Марина Васильевна, Козлюк Виталий Викторович, Чубарь Евгения Петровна.....	212
УДАЛЕНИЕ ЧАСТИЦ МИКРОПЛАСТИКА ИЗ ПРИРОДНЫХ ВОД Г. САНКТ-ПЕТЕРБУРГА И ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ С ПОМОЩЬЮ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ <i>CHLORELLA KESSLERI</i> Бондаренко Кристина Александровна, Зибарев Никита Васильевич, Политаева Наталья Анатольевна, Пугачева Дарья Алексеевна, Белоусова Вита Юрьевна.....	218
ПРИМЕНЕНИЕ ЭМПИРИЧЕСКОЙ ФОРМУЛЫ В ОЦЕНКЕ БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ Дементьева Юлия Васильевна, Татаринцев Святослав Дмитриевич.....	227
РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ УСЛОВИЙ ТРУДА НА ПРЕДПРИЯТИЯХ С НАНОДИСПЕРСНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ Самарин Евгений Владимирович, Хайруллин Руслан Зуфарович.....	232
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА УРОВЕНЬ ЗРЕЛОСТИ ПРОЦЕССА ВНУТРЕННЕГО РАССЛЕДОВАНИЯ ПРОИСШЕСТВИЙ Никитина Дарья Александровна, Фомина Екатерина Евгеньевна.....	242
ВЫБОР СОРБИРУЮЩИХ СРЕД ДЛЯ ПАССИВНОГО ОТБОРА ПРОБ ОКСИДА УГЛЕРОДА Таранцева Клара Рустемовна, Худойбердиев Максуджон Саиджон-Угли, Курочкина Ольга Геннадьевна.....	248
МОДЕЛИРОВАНИЕ, ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ, СВЯЗАННЫХ С ЛЕСНЫМИ ПОЖАРАМИ Баденко Владимир Львович, Федоров Михаил Петрович, Масликов Владимир Иванович, Молодкина Людмила Михайловна.....	255

CONTENT

INFORMATION SCIENCE, COMPUTING DEVICES AND CONTROLLING

APPLICATION OF METHODS BASED ON *RETINEX* THEORY IN PROCESSING COLOR IMAGES OBTAINED IN MINES

Zaytseva Ekaterina Viktorovna, Kochneva Alina Alexandrovna,
Katuntsov Evgeny Vladimirovich, Romakina Oksana Mihalovna.....10

DEVICE FOR SIMULATING CARDIO SIGNALS IN A TRAINING SIMULATOR

Chulkov Valery Alexandrovich, Serzhantova Natalya Aleksandrovna.....18

INFORMATION MODELING TECHNOLOGIES AS A TOOL FOR DIGITIZATION OF THE CONSTRUCTION INDUSTRY

Gusarova Alla Alexandrovna.....25

MANAGEMENT OF PREVENTIVE MAINTENANCE TO PREVENT CAR FIRES AT A MOTOR TRANSPORT COMPAN

Motorygin Yuri Dmitrievich, Litovchenko Irina Olegovna, Topilkin Pavel Sergeevich.....35

RISC ARCHITECTURE MICROPROCESSOR SOFTWARE CORE BASED ON A FIELD-PROGRAMMABLE GATE ARRAY

Kolchugina Elena Anatolievna, Martyshkin Alexey Ivanovich,
Pashchenko Dmitry Vladimirovich, Trokoz Dmitry Anatolyevich.....42

EVELOPMENT OF AN INTELLIGENT DECISION SUPPORT SYSTEM BASED ON A CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK

Shurshev Timofey Valerievich, Khomenko Tatyana Vladimirovna.....50

COMPARISON OF THE EFFECTIVENESS OF NEURAL NETWORKS TO IMPROVE THE RESOLUTION OF ROAD SURFACE IMAGES

Zhuravlev Alexander Alexandrovich.....58

APPROACHES TO DIGITAL IMAGE PROCESSING IN THE MINING INDUSTRY

Zaytseva Ekaterina Viktorovna, Kochneva Alina Alexandrovna,
Katuntsov Evgeny Vladimirovich, Kiba Maria Romanovna.....62

TECHNIQUE FOR CONVERSION OF THE DIRECTION DIAGRAM OF A HORN ANTENNA INTO A WEIGHTED GRAPH

Merzlyakov Yuri Vladimirovich, Pashchenko Dmitry Vladimirovich.....68

FOOD TECHNOLOGY

THE EFFECT OF STORAGE ON THE GOOSEBERRY QUALITY CHARACTERISTICS (*RIBES UVA-CRISPA* L.)

Golub Olga Valentinovna, Motovilova Natalya Vladimirovna,
Chekryga Galina Petrovna, Petruk Vera Alexandrovna.....75

SYNERGISTIC EFFECT IN THE TREATMENT OF WHEAT SEEDS WITH LOW DOSES OF γ -RADIATION

Timakova Roza Temer'janovna, Iliukhin Ruslan Vasilievich.....83

INFLUENCE OF VEGETABLE CROPS CONTAMINATION ON THE PROCESSES OF STORAGE AND PROCESSING OF AGRICULTURAL RAW MATERIALS

Shkolnikova Marina Nikolaevna, Abbazova Venera Nagimovna.....90

**EFFECTS OF HEAT TREATMENT METHODS ON ORGANOLEPTIC
AND PHYSICO-CHEMICAL PARAMETERS OF MUTTON MEAT**

Chugunova Olga Viktorovna, Stepneva Ekaterina Vitalevna,
Kryukova Ekaterina Vladimirovna, Kokoreva Larisa Anatolevna.....96

**ASSESSMENT OF PROTEIN CONTENT AND AMINO ACID COMPOSITION
OF OFFAL OF PIGS OF THE "LARGE WHITE" BREE**

Razumovskaya Elena Sergeevna, Milentyeva Irina Sergeevna, Neverova Olga Alexandrovna.....103

TECHNOSPHERE SAFETY**TRANSFORMATION OF ENVIRONMENTAL PARAMETERS INTO INDICATORS
OF PRODUCTION RISK AT ENTERPRISES**

Borisova Anastasia Viktorovna, Balanova Marina Vasilyevna,
Kozlyuk Vitaly Viktorovich, Chubar Evgeniya Petrovna.....108

**INVESTIGATION OF THE WETTING ABILITY OF SURFACTANTS TO SUPPRESS
THE RESPIRATORY FRACTION OF DUST IN THE PRODUCTION OF MASS EXPLOSIONS**

Korshunov Gennadiy Ivanovich, Karimov Artur Maratovich.....113

UTILIZATION OF HIGHER AQUATIC PLANTS IN ORDER TO OBTAIN BIOGAS

Politaeva Natalya Anatolyevna, Velmozhina Ksenia Alekseevna,
Shinkevich Polina Sergeevna, Bondarenko Kristina Aleksandrovna, Efremova Sania Yunusovna.....119

**EVALUATION OF THE STATE OF THE CATHODE REMAIN OF LITHIUM-ION
BATTERIES AFTER THERMAL RUNNING DURING EXAMINATION OF FIRE**

Mokryak Anna Vasievna, Melnik Anton Anatolyevich.....127

**EXPERT STUDY OF FACTORS HAVING THE GREATEST INFLUENCE ON
OCCUPATIONAL SAFETY IN THE RAILWAY TRACK COMPLEX**

Navtsenya Vladimir Yurievich, Narusova Elena Yurievna, Koroleva Anna Mikhailovna.....135

**ANALYSIS OF THE THEORY AND PRACTICE OF ENVIRONMENTAL SAFETY
ASSESSMENT AT THE STAGES OF THE SHIP'S LIFE CYCLE**

Naumov Victor Stepanovich, Kochneva Irina Borisovna.....140

**SAFETY MEASURES IMPROVING DURING WORKING ON UNSTABLE WOODEN
SUPPORTS USING ATTACHED LADDERS**

Senchenko Vladimir Alexandrovich, Kaverzneva Tatiana Timofeevna,
Fetisov Alexander Georgievich, Messineva Ekaterina Mikhailovna.....145

JUSTIFICATION OF THE PARAMETERS OF THE FOREST FIRES EARLY DETECTION SYSTEM

Bogdanov Andrey Vladimirovich, Suleymanov Igor Eduardovich.....152

**ASSESSMENT OF THE EFFECTIVENESS OF A NEUTRALIZER FOR TOXIC
COMPONENTS OF FLUE GASES FOR REDUCING THE CONTENT
OF NITROGEN OXIDES IN THE AIR ENVIRONMENT**

Balandina Olga Alexandrovna.....157

**ANALYSIS OF OCCUPATIONAL RISK OF NOISE AND VIBRATION
EXPOSURE FOR OIL MINE WORKERS**

Miakov Vladislav Vladimirovich, Korshunov Gennadiy Ivanovich.....164

DETERMINING THE TYPE OF LITHIUM-ION BATTERIES AN ELECTRIC BIKE AFTER A FIRE

Mokryak Anna Vasievna, Pariyskaya Anna Iurevna.....170

MODEL OF ACCIDENTAL LEAKAGE OF HYDROGEN GAS IN A ROOM WITH SUPPLY AND EXHAUST VENTILATION IN <i>FIRE DYNAMICS SIMULATOR (FDS)</i>	
Timoshenko Artem Leonidovich, Samigullin Gafur Khalafovich, Bulatov Vyacheslav Olegovich.....	176
ASSESSMENT OF THE PROSPECTS FOR REDUCING THE NEGATIVE IMPACT ON THE ENVIRONMENT WHEN SWITCHING TO THE BEST AVAILABLE TECHNOLOGIES OF INDUSTRIAL ENTERPRISES	
Kondrateva Ol'ga Evgen'evna, Loktionov Oleg Aleksandrovich, Borovkova Anastasiya Mikhaylovna, Zvonkova Natal'ya Vladimirovna.....	188
CONTINUOUS CONTROL OF OIL PRODUCTS IN THE EFFLUENTS OF THE COOLING SYSTEM OF THERMAL POWER PLANTS	
Badenko Vladimir Lvovich, Molodkina Lyudmila Mikhailovna, Tarasevskiy Philip Georgievich.....	198
ASSESSMENT OF THE SOCIO-ECONOMIC EFFICIENCY OF THE APPLICATION OF THE METHODOLOGY FOR ASSESSING OCCUPATIONAL RISKS, TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF THE HUMAN FACTOR OF EMPLOYEES OF THE ELECTRIFICATION AND POWER SUPPLY FACILITIES	
Chaplygin Vladimir Sergeevich.....	206
METHODOLOGY FOR CALCULATING A QUANTITATIVE ASSESSMENT OF THE POTENTIAL HAZARD OF PRODUCTION PROCESSES	
Borisova Anastasia Viktorovna, Balanova Marina Vasilyevna, Kozlyuk Vitaly Viktorovich, Chubar Evgeniya Petrovna.....	212
REMOVAL OF MICROPLASTIC PARTICLES IN NATURAL WATER SAMPLES ST. PETERSBURG AND LENINGRAD REGION WITH THE HELP MICROALGAE <i>CHLORELLA KESSLERI</i>	
Bondarenko Kristina Aleksandrovna, Zibarev Nikita Vasilyevich, Politaeva Natalya Anatolyevna, Pugacheva Darya Alekseevna, Belousova Vita Yuryevna.....	218
APPLICATION OF AN EMPIRICAL FORMULA IN ASSESSING ROAD SAFETY	
Dementieva Yulia Vasilievna, Tatarintsev Svyatoslav Dmitrievich.....	227
DEVELOPMENT OF LABOR CONDITIONS SPECIAL EVALUATION FOR COMPANIES WITH NANODISPERSED MATERIALS	
Samarin Evgeny Vladimirovich, Khayrullin Ruslan Zufarovuch.....	232
IDENTIFICATION OF FACTORS WHICH IMPACT INTERNAL INCIDENT INVESTIGATION EFFICIENCY	
Nikitina Daria Alexandrovna, Fomina Ekaterina Evgenyevna.....	242
SELECTION OF SORBENT MEDIA FOR PASSIVE CARBON OXIDE SAMPLING	
Tarantseva Klara Rustemovna, Khudoberdiev Maksudzhon Saidzhon-Ugli, Kurochkina Olga Gennadiyevna.....	248
MODELING, FORECASTING AND ASSESSMENT OF HAZARDOUS PHENOMEN A ASSOCIATED WITH FOREST FIRES	
Badenko Vladimir Lvovich, Fedorov Mikhail Petrovich, Maslikov Vladimir Ivanovich, Molodkina Lyudmila Mikhailovna.....	255

УДК 004.932.4

EDN: QRJBPU

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ, ОСНОВАННЫХ НА ТЕОРИИ *RETINEX*, ПРИ ОБРАБОТКЕ ЦВЕТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ В ШАХТАХ

© Автор(ы) 2024

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, город Санкт-Петербург, линия 21-я В.О., дом 2, e-mail: Zaytseva_EV@pers.spmi.ru)

SPIN: 8139-9418

AuthorID: 906326

ORCID: 0000-0002-8189-782X

ResearcherID: K-5359-2017

ScopusID: 57189387806

КОЧНЕВА Алина Александровна, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Информатики и компьютерных технологий»

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II

(199106, город Санкт-Петербург, линия 21-я В.О., дом 2, e-mail: Kochneva_AA@pers.spmi.ru)

SPIN: 6378-6951

AuthorID: 728974

ORCID: 0000-0001-8345-0979

ResearcherID: Q-4914-2016

ScopusID: 57191523004

КАТУНЦОВ Евгений Владимирович, кандидат технических наук, первый заместитель директора
института «Базового инженерного образования» – заместитель по образовательной деятельности

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II

(199106, город Санкт-Петербург, линия 21-я В.О., дом 2, e-mail: Katuntsov_EV@pers.spmi.ru)

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, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А., e-mail: omromakina@itmo.ru)

Аннотация. Исследованы методы обработки изображений, основанные на теории *Retinex* – *Single-Scale Retinex* и *Multi-Scale Retinex*, применительно к изображениям в шахтных выработках. Эффективность методов оценивается в сравнении с классическим методом гамма-коррекции, для чего шахтные изображения обработаны тремя методами и построены соответствующие гистограммы распределения яркости с последующим сопоставлением и оценкой качества и численных показателей визуального восприятия. Предложена методика подбора коэффициентов как для классического метода гамма-коррекции, так и для *Single-Scale Retinex* и *Multi-Scale Retinex* методов с учетом средних значений уровней яркости исходных изображений. На основании сравнения методов *Single-Scale Retinex* и *Multi-Scale Retinex* с классическим методом гамма-коррекции и другими известными методами обработки полученных в шахтах видеоданных сделаны выводы относительно целесообразных областей применения и направлений совершенствования этих методов.

Ключевые слова: изображение, видеоданные, цифровая обработка, горная промышленность, теория *Retinex*, контрастность, резкость, яркость.

APPLICATION OF METHODS BASED ON *RETINEX* THEORY IN PROCESSING COLOR IMAGES OBTAINED IN MINES

© Автор(ы) 2024

ZAYTSEVA Ekaterina Viktorovna, candidate of technical sciences,
associate professor of the department of «Informatics and Computer Technologies»

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University
(199106, building 2, line 21st V.O., St. Petersburg, Russia, e-mail: Zaytseva_EV@pers.spmi.ru)

KOCHNEVA Alina Alexandrovna, candidate of technical sciences,
associate professor of the department of «Informatics and Computer Technologies»

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University
(199106, building 2, line 21st V.O., St. Petersburg, Russia, e-mail: Kochneva_AA@pers.spmi.ru)

KATUNTSOV Evgeny Vladimirovich, candidate of technical sciences,
first deputy director of the «Institute of «Basic Engineering Education» - deputy for educational activities

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University
(199106, building 2, line 21st V.O., St. Petersburg, Russia, e-mail: Katuntsov_EV@pers.spmi.ru)

ROMAKINA Oksana Mihalovna, candidate of technical sciences,
associate professor of the faculty of «Infocommunication Technologies»

ITMO University
(197101, Kronverksky Pr. 49, bldg. A, St. Petersburg, Russia., e-mail: omromakina@itmo.ru)

Abstract. Image processing methods based on the Retinex theory - Single-Scale Retinex and Multi-Scale Retinex - have been studied in relation to images in mine workings. The effectiveness of the methods is assessed in comparison with the classical gamma correction method, for which mine images are processed by three methods and corresponding brightness distribution histograms are constructed, followed by comparison and assessment of the quality and numerical indicators of visual perception. A methodology for selecting coefficients for both the classical gamma correction method and Single-Scale Retinex and Multi-Scale Retinex methods is proposed, taking into account the average values of the brightness levels of the original images. Based on a comparison of the Single-Scale Retinex and Multi-Scale Retinex methods with the classical gamma correction method and other known methods of processing video data obtained in mines, conclusions were drawn regarding appropriate areas of application and directions for improving these methods.

Keywords: image, video data, digital processing, mining, Retinex theory, contrast, sharpness.

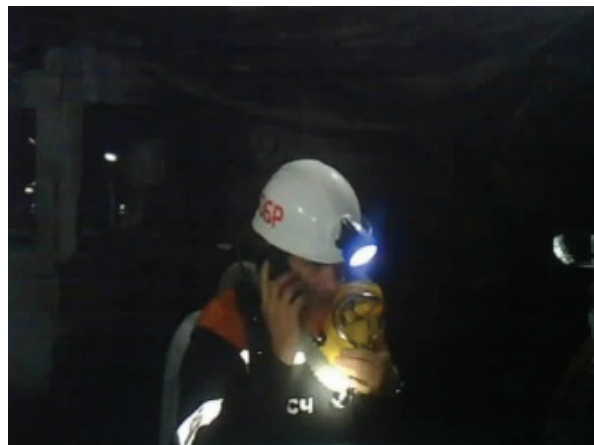
Для цитирования: Зайцева Е.В. Применение методов, основанных на теории Retinex, при обработке цветных изображений, полученных в шахтах / Е.В. Зайцева, А.А. Кочнева, Е.В. Катунцов, О.М. Ромакина // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 1(65). – С. 10-17. – EDN: QRJBPY.

Введение. В современном обществе системы видеонаблюдения используются повсеместно. Применение видеокамер на участках технологических процессов в разных отраслях промышленности делает производственный процесс более предсказуемым и контролируемым [1-3]. Помимо стационарных видеокамер, находящихся на важных участках, приборы видения размещаются в устройствах связи персонала, используются для фиксирования обстановки при чрезвычайных ситуациях [4-6]. На качественные характеристики таких фото и видеоданных накладываются ограничения условия, при

которых происходит фото и видео съемка.

Для фото и видеоданных, сделанных в шахтах, характерны низкие освещенность, контрастность, резкость и средний уровень яркости. Кроме того «неподготовленному зрителю» цветные изображения могут показаться и вовсе изображениями в оттенках серого, что обусловлено плохой освещенностью снимаемого участка – большинство изображений только вблизи осветительных приборов имеют достаточную яркость [7-10].

Примеры таких изображений представлены на рисунке 1.



а)

б)

Рисунок 1 – Изображение, полученное в шахте [из источника 3]

На рисунке 1а можно выделить участки изображения, которые нуждаются в дополнительной обработке: правый нижний угол, который выглядит просто черным пятном, неразличимы области в глубине изображения за шахтерами и под их ногами. На рисунке 1б различима фигура шахтера, а помещение вокруг нее не просматривается.

Целью обработки изображения при слабом освещении является извлечение скрытых деталей, удаление шума, восстановление деталей и цветовых тонов, а также увеличение динамического диапазона и контрастности. Методы повышения контрастности при слабом освещении можно разделить на классические и подходы, основанные на глубоком обучении нейросети [11-13]. Классические методы в свою очередь можно разделить на методы выравнивания гистограмм, гамма-коррекции и методы, основанные на теории *Retinex* [14-16]. В данной статье представлено сравнение методов, основанных на теории *Retinex* с гамма-коррекцией. Методы, основанные на выравнивании гистограммы, нуждаются в отдельном изучении и требуют особого подхода в связи с наличием на изображениях, полученных в шахтах, участков вблизи источника освещения с максимальной яркостью. Такие методы нуждаются в корректировке контрастности, характеристики которой выделяются из «красной», «зелёной» и синей составляющей изображения.

Методология. Контрастность K монохромного изображения можно определить как [17-19]:

$$K = L_{max} - L_{min},$$

где L_{max} , L_{min} – соответственно максимальная и минимальная яркость пикселей на изображении. Относительная контрастность k находится по формуле:

$$k = \frac{K}{255},$$

где 255 — максимально возможная яркость в любом из каналов цветовой модели *RGB*.

Как правило, для увеличения резкости и повышения контраста используется классический метод гамма-коррекции [15]:

$$L = L_{max} \Delta k^n, \quad (1)$$

где: L' – яркость пикселей обработанного изображения; $\Delta k = L / L_{max}$ – относительная яркость, которая позволяет регулировать контрастность путем снижения максимальных значений яркости в одной области изображения, тем самым увеличивая локальную контрастность другой области изображения; n – коэффициент гамма-коррекции.

Эффективность работы алгоритма гамма-коррекции определяется надлежащим подбором коэффициента n , который для изображений, полученных в шахтах, определяется в зависимости от средней яркости изображения. Зависимость коэффициента гамма-коррекции от уровня средней яркости изображения была найдена опытным путём

для полученных в шахтах цветных изображений. Для видеоданных, представленных на рисунке 1а, этот коэффициент равен 0,45, а на рисунке 1б – 0,35.

Согласно теории Лэнда [13] изображение можно разложить на карты отражения и освещенности, где часть отражения считается внутренним свойством и остается неизменной при всех условиях освещения. Реализации *Retinex* согласно публикациям [12, 14-15] используют различную геометрию при расчете относительной яркости соседних пикселей для получения компонента отражения.

Single-Scale Retinex (SSR) является алгоритмом, который производит выравнивание освещенности изображения и при этом сохраняет контраст в ярко и плохо освещенных областях. Формула данного алгоритма имеет вид:

$$R(x,y,sigma) = \log[I(x,y)] - \log[I(x,y) \otimes G(x,y,sigma)] \quad (2)$$

где: G – Гауссиан; $I(x,y)$ – яркости «красной», «зелёной» или «синей» составляющих изображения в соответствующей точке x, y ; $R(x,y,sigma)$ – полученные в результате работы алгоритма *SSR* яркости «красной», «зелёной» и «синей» составляющих изображения; $sigma$ – коэффициент размытия; $\otimes$ – оператор свертки. Считается, однако, что алгоритм *SSR* искажает цветовой баланс, поэтому для выравнивания цветопередачи был разработан алгоритм *Multi-Scale Retinex (MSR)*:

$$MSR = w_1 \cdot SSR_1 + w_2 \cdot SSR_2 + \dots + w_n \cdot SSR_n, \quad (3)$$

где $w_1, w_2 \dots w_n$ – весовые коэффициенты составляющих *SSR*, чаще всего $n = 3$ и $w_1 + w_2 + w_3 = 1$.

Эффективность методов *Retinex* обычно зависит от тщательной настройки параметров [20-22], которые зависят от особенностей изображений. Для изображений, полученных в шахтах, коэффициенты определяются средним значением яркости изображения. Исходя из этого, сформируем коэффициенты для методов *SSR* и *MSR Retinex*. Таким образом, алгоритм обработки, основанный на теории *Retinex*, для изображений, полученных в шахтах, будет выглядеть следующим образом:

- 1) определение средней яркости кадра;
- 2) задание коэффициента $sigma$ как средней яркости кадра;
- 3) обработка кадра в соответствии с зависимостью (2).

Результаты. Чтобы количественно оценить качество обработки изображений (рис. 1) для них составлены гистограммы распределения яркостей, они показаны на рисунке 2. На рисунке 3а представлено то же изображение после обработки методом гамма-коррекции, а на рисунке 3б – гистограмма распределения яркости полученного изображения. Поскольку средняя яркость исходного изображения составляет 49,9 уровня яркости, то коэффициент гамма-коррекции был выбран равным 0,45.

Как мы видим, на рисунке 3а область правого нижнего угла визуализируется, становятся видны очертания предметов. Также появляются силуэты объектов в глубине изображения за шахтерами. В

области «под ногами шахтеров» появляется некая текстура поверхности. Тем не менее полностью нарушается цветопередача, изображений становится размытым. Сравнивая гистограмму на рисунке 2а и 3б, мы также видим перераспределение яркости по всем участкам изображения, что и приводит к искажению цвета.

На рисунке 4 представлены а – обработанное методом гамма-коррекции (1) изображение на рисунке 1б, б – гистограмма распределения яркости полученного изображения. Средняя яркость изображения на рисунке 1б составляет 31,3 уровня яркости, поэтому коэффициент гамма-коррекции на основании таблицы 1 был выбран 0,35.

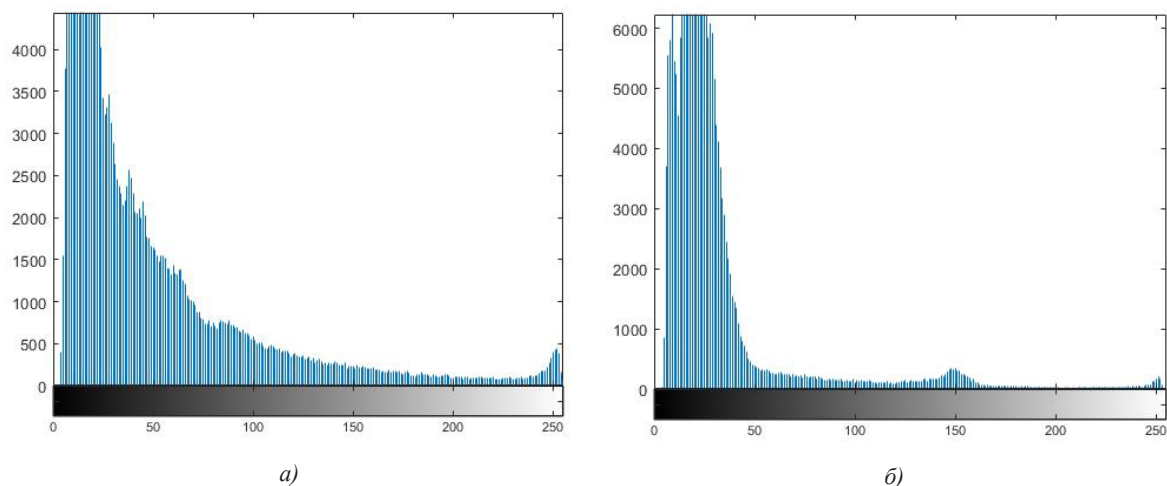


Рисунок 2 – Гистограммы распределения яркостей изображений рисунка 1

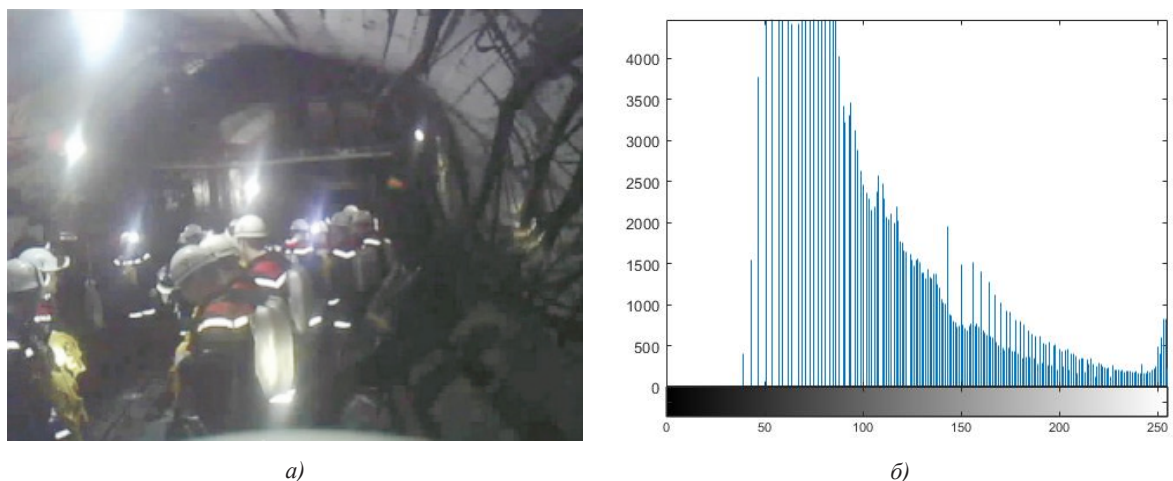


Рисунок 3 – Изображение 1а после гамма-коррекции (а) и его гистограмма распределения яркости (б) [получено авторами]

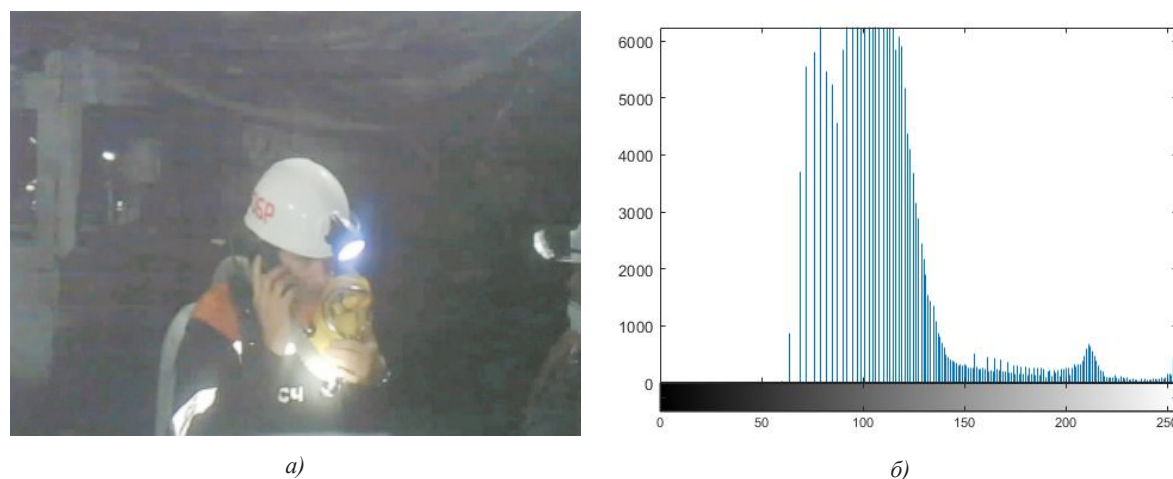


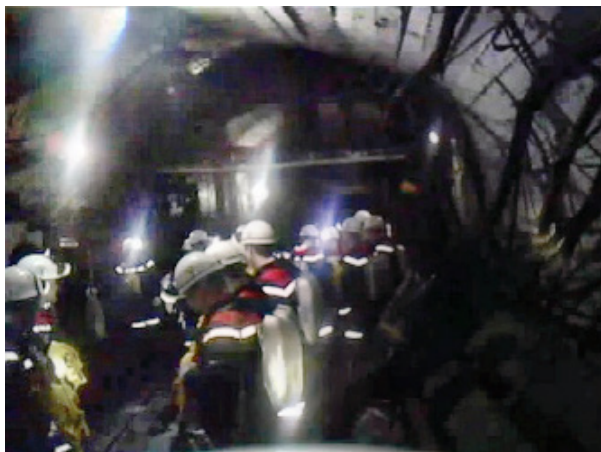
Рисунок 4 – Изображение 1б после гамма-коррекции (а) и его гистограмма распределения яркости (б)

На рисунке 4а можно заметить очертания помещения вокруг фигуры шахтера, контрастность изображения возросла.

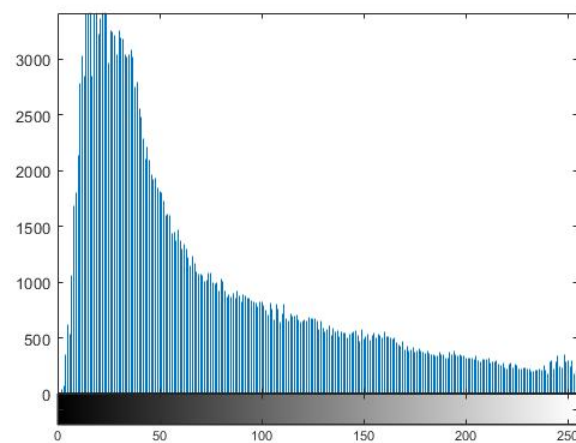
Однако цветопередача по прежнему нарушена, наблюдается также размытие контуров. Сравнивая гистограммы на рисунках 2б и 3б, можно видеть перераспределение яркости по всем участкам изображения, что также характеризует искажение цвета.

Далее исходные изображения (рис. 1) обработаны методом SSR (2), основанным на теории Retinex. При

этом в качестве коэффициента σ использовано значение средней яркости исходного изображения: для изображения на рисунке 1а $\sigma = 49,9$, а для изображения на рисунке 1б $\sigma = 31,3$. Результаты обработки рисунка 1а представлены на рисунке 5: а – обработанное методом SSR изображение, б – гистограмма распределения яркости полученного изображения, на рисунке 6а показаны результаты обработки изображения рисунка 1б, а на рисунке 6б – гистограмма распределения яркости полученного изображения.

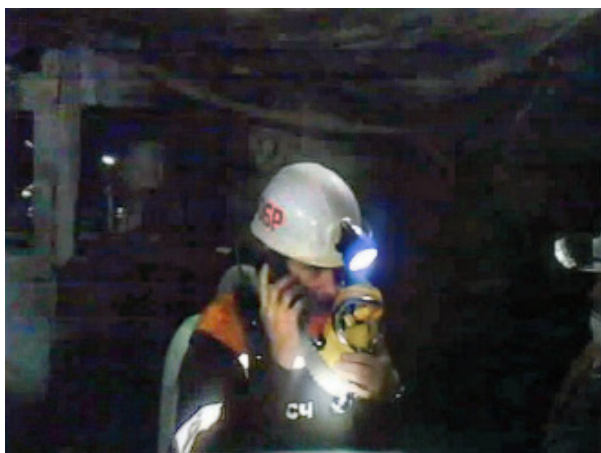


а)

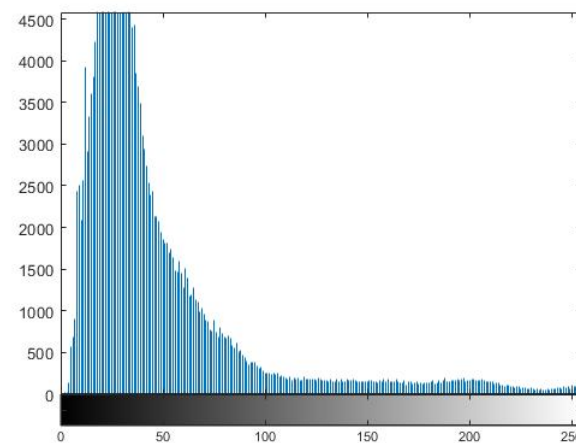


б)

Рисунок 5 – Изображение 1а после применения алгоритма SSR (а) и его гистограмма распределения яркости (б)



а)



б)

Рисунок 6 – Изображение 1б после применения алгоритма SSR (а) и гистограмма распределения его яркости (б)

Хотя цветопередача изображений осталась без изменений, области, которые были означены как малоразличимые, визуализировались, появились очертания предметов. Как в случае с гамма-коррекцией искажения цветопередачи не наблюдается. Из сравнения гистограмм на рисунках 2а и 5б следует, что яркость перераспределится из диапазона от 0 до 50 в диапазон 150-200 уровней. Сравнение гистограмм рисунках 2б и 6б демонстрирует смещение яркости из диапазона 0-50 в диапазон 50-100 уровней. «Мягкая» корректировка гистограмм обоих изображений

позволяет улучшить результат в части цветопередачи.

Исходные изображения (рис. 1) обработаны также основанным на теории Retinex методом MSR (3). В качестве коэффициента σ при использовании данного метода взято значение средней яркости исходного изображения: для изображения на рисунке 1а $\sigma = 49,9$ – для SSR1, $\sigma = 127$ – для SSR2, $\sigma = 255$ – для SSR3, а изображения на рисунке 1б $\sigma = 31,3$ – для SSR1, $\sigma = 127$ – для SSR2, $\sigma = 255$ – для SSR3, коэффициенты $w_1 = w_2 = w_3 = 0,33$. На рисунке 7 представлены результаты применения этого

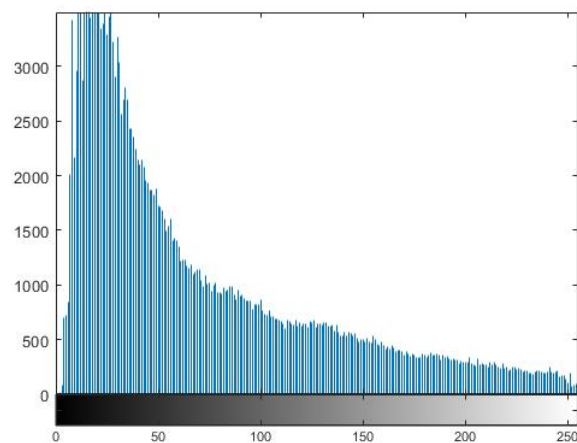
метода к рисунку 1а: а – обработанное изображение, б – гистограмма распределения яркости полученного изображения. На рисунках 8а и б – результаты обработки изображения на рисунке 1б, соответственно итоговое изображение и гистограмма яркости.

Сравнивая рисунки 5а и 7а можно заметить, что последний более контрастный, что следует и

из гистограмм распределения их яркости, демонстрирующих перемещение из диапазона от 0 до 50 в диапазон 150-200 уровней. На гистограмме 7б такое перераспределение коснулось меньшего числа пикселей. То же самое наблюдается и на гистограммах рисунков 6б и 8б, только это касается диапазона от 50 до 100 уровней яркости.

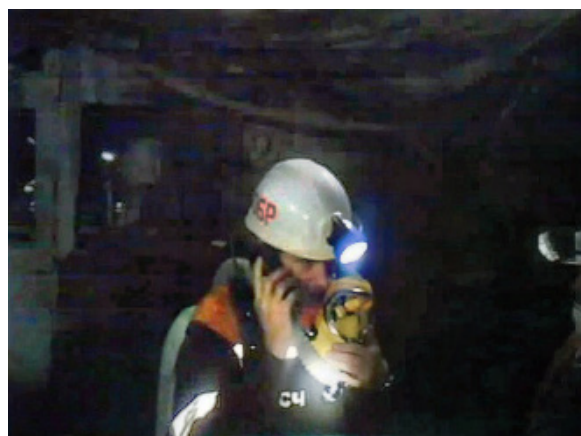


а)

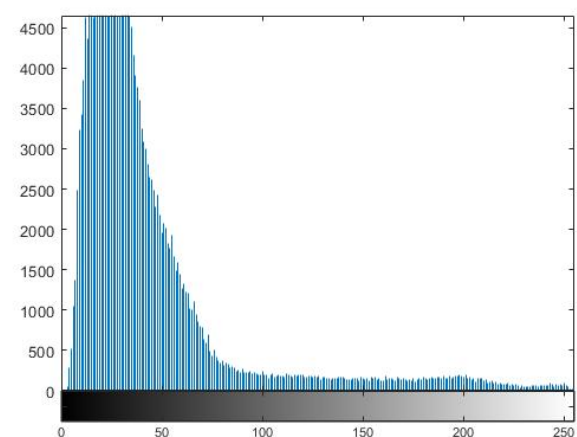


б)

Рисунок 7 – Изображение 1а после применения алгоритма MSR (а) и его гистограмма распределения яркости (б)



а)



б)

Рисунок 8 – Изображение 1б после применения алгоритма MSR (а) и его гистограмма распределения яркости (б)

Таким образом, методы *SSR* и *MSR* улучшают показатели освещенности и восстанавливают сцены для цифровых изображений, полученных в шахтах, однако вблизи краев наблюдаются артефакты ореолов.

Обсуждение. Методы *SSR* и *MSR* показали свою эффективность, позволяя улучшить резкость и контрастность полученных в шахтах изображений. Визуальная оценка, анализ рисунков 1, 3-8 позволяет заключить, что данные методы превосходят классический алгоритм гамма-коррекции и в части цветопередачи, и в части «близости» полученного изображения к оригиналу. Количественная оценка, следующая из анализа гистограмм (рис. 2-8), также подтверждает преимущество методов, основанных на теории *Retinex*.

Однако не стоит забывать о ресурсозатратности методов. Поскольку классический метод гамма-коррекции относится к глобальным методам, то он требует небольших временных ресурсов [23-25]. Поскольку методы, основанные на теории *Retinex*, относятся к локальным методам, то и временных ресурсов требуют значительно больше. Применение методов *SSR* и *MSR* оправдано при постобработке видеоданных, когда режим съёмки и режим обработки разделены во времени [26-28]. Подобная обработка может потребоваться при анализе тех или иных происшествий: поломках, выходе из строя оборудования, несчастных случаях, тогда как применение методов, подобных гамма-коррекции, оправдано в режиме реального времени, когда требуется быстрое принятие решения на основе по-

лученных видеоданных.

Следует заметить, что исходные изображения получены без импульсного шума. Однако в горной промышленности при видеосъемке технологических процессов наблюдается зашумление типа «соль» [29-31], вызванное, к примеру, угольной пылью. Применение к таким изображениям методов, основанных на теории *Retinex*, позволит добиться высокого визуального качества итоговых видеоданных даже без применения фильтров ранговых статистик, в частности медианного фильтра для коррекции шумовой составляющей.

Дополнительного исследования требует обоснование выбора коэффициентов σ метода *SSR* и $w_1=w_2=w_3$ метода *MSR*, а также выявление их связи со средней яркостью цифрового изображения. Обычно при применении методов, основанных на теории *Retinex*, требуется цветокоррекция, необходимости в которой в данной работе не установлено. Поэтому следует изучить большее количество изображений, полученных в шахтах, и сделать по этому поводу выводы.

В данной статье методы, основанные на теории *Retinex*, применялись к цифровому пространству *RGB*. Существует подход, предусматривающий преобразование изображения из цветового пространства *RGB* в цветовое пространство *HSV* [32-34]. Коррекция изображения алгоритмами *SSR* и *MSR* в таком случае применяется только к одному каналу *V*, соответствующему яркости изображения [35]. Следует провести исследования данных методов и сравнить с полученными результатами данной статьи.

Отдельно стоит коснуться метода эквализации гистограммы. Эквализация в пространстве *RGB* приведет к чрезмерной яркости в области источника освещения и как следствие к «засветке» данной области. Имеет смысл исследовать применение метода эквализации гистограммы в цветовом пространстве *HSV* только к одному каналу *V*. Данный метод также нуждается в исследовании и сравнении с полученными здесь данными.

Выводы. В работе произведено исследование методов обработки изображений *SSR* и *MSR*, основанных на теории *Retinex*. Оценена эффективность данных методов в сравнении с классическим методом гамма-коррекции. Представлены гистограммы распределения яркости по всем использованным методам. Даны пояснения и предложена методика выборов коэффициентов как для классического метода гамма-коррекции, так и для *SSR* и *MSR* методов. Определены визуальные и количественные характеристики качества изображения и указаны недостатки как классического метода гамма-коррекции, так и методов *SSR* и *MSR*. Даны рекомендации по выбору методов обработки изображений, исходя из их достоинств и недостатков. Обоснованы направления совершенствования методов, основанных на теории *Retinex*, и других методов обработки видеоданных, полученных в шахтах.

Методология цифровой обработки изображений, полученных в шахтах, неотделима от классической методологии цифровой обработки изображений, с учетом особенностей видеоданных, снятых при низких уровнях освещения, подбираются режимы и параметры применения выбранной технологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Новиков А.В., Паневников К.В., Писарев И.В. Многофункциональная система безопасности угольных шахт – визуализация событий (горнотехнических процессов) с рабочего места шахтера. // Горная промышленность. – 2021. – № 5. – С. 65-69. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-5-65-69.
2. Выстрчил М.Г., Гусев В.Н., Сухов А.К. Методика определения погрешностей сегментированных GRID моделей открытых горных выработок, построенных по результатам аэрофотосъемки с беспилотного воздушного судна // Записки Горного института. – 2023. – Т. 262. – С. 562-570. EDN SZOFVD.
3. Череповицын А.Е., Третьяков Н.А. Разработка новой системы оценки применимости цифровых проектов в нефтегазовой сфере // Записки Горного института. – 2023. – Т. 262. – С. 628-642. EDN QYBHMС.
4. Ключев Р.В., Моргоева А.Д., Гаврина О.А., Босиков И.И., Моргоев И.Д. Прогнозирование планового потребления электроэнергии для объединенной энергосистемы с помощью машинного обучения // Записки Горного института. – 2023. – Т. 261. – С. 392-402.
5. Куликова Е.Ю., Полянкин А.Г., Потоккина А.М. Специфика управления геотехническими рисками при проектировании подземных сооружений // Записки Горного института. – 2023. – Т. 264. – С. 895-905. EDN DGEAGK.
6. Litvinenko V.S., Bowbrick I., Naumov I.A., Zaitseva Z. Global guidelines and requirements for professional competencies of natural resource extraction engineers // Implications for ESG principles and sustainable development goals. J. of Cleaner Production. – 2022. – № 338. – P. 1-9. doi 10.1016/j.jclepro.2022.130530.
7. Makhovikov A.B. Development of the boundaries of science and education in the USSR (Russia) from the 1960s to the end of the 2010s. (based on materials from St. Petersburg Mining University) // Questions of history. – 2022. – No. 11. – P. 56-69. DOI: 10.31166/VoprosyIstorii202211Statyi08.
8. Khokhlov V., Lukin V., Khokhlov S. Modelling full-colour images of earth: Simulation of radiation brightness field of Earth's atmosphere and underlying surface. // Annals of GIS. 2022 doi:10.1080/19475683.2022.2064911.
9. Mustafaev A.S., Popova A.N., Sukhomlinov V.S. A new technique of eliminating the actual plasma background when calibrating emission spectrometers with a CCD recording system // Applied Sciences. – 2022. – № 12(6). doi:10.3390/app12062896.
10. Yu. Ol't, Maksarov V.V., Makhov V.E. Intelligence systems for quality assessment of threaded surfaces and flaw monitoring based on digital light field recording // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2020. – № 56(11). – P. 915-926. doi:10.1134/S1061830920110054.
11. Komilova E.V. The interdisciplinary approach to the conceptualization of the image of the arctic and the north in the mass consciousness // An example of russian students. Social Sciences. – 2022. – № 11(12). doi:10.3390/socsci11120580.
12. Cooper T.J., Baqai F.A. Analysis and extensions of the Frankle-McCann *retinex* algorithm // J. Electron. Imaging. – 2004. – № 13 (1). – P. 85-92.
13. Land E.H. Recent advances in *retinex* theory and some implications for cortical computations: color vision and the natural image // Proc. Natl. Acad. Sci.USA. – 1983. – № 80 (16). – P. 51-63.
14. Land E.H. An alternative technique for the computation of the designator in the *retinex* theory of color vision // Proc. Natl. Acad. Sci. – 1986. – №83 (10). – P. 3078-3080.
15. Zhang Y., Zhang X. Di. B., Yan Q. Li. S., Wang C. Self-supervised low light image enhancement and denoising // arXiv preprint arXiv:2103.00832. 2021.
16. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
17. Brooks C.N., Dobson R.J., Dean D.B., Banach D., Oom-

- men T., Havens T.C., Ahlborn T., Cook S.J., Clover A. Evaluating the use of unmanned aerial vehicles for transportation purposes // Michigan Department of Transportation. Michigan, USA. – 2015. Report No. RC-1616. – 201 p.
18. Zhang H., Tao P., Meng X., Liu M., Liu X. An optimum deployment algorithm of camera networks for open-pit mine slope monitoring // *Sensors*. – 2021. – vol. 21. – № 4. – article 1148. DOI: 10.3390/s21041148.
19. Temkin I., Myaskov A., Deryabin S., Konov I., Ivannikov A. Design of a digital 3D model of transport—technological environment of open-pit mines based on the common use of telemetric and geospatial information // *Sensors*. – 2021. – vol. 21. – № 18. article 6277. DOI: 10.3390/s21186277.
20. Зотин А.Г., Проскурин А.В. Повышение быстродействия алгоритмов выравнивания освещенности на основе технологии *Retinex* при программной реализации В сборнике: Цифровая обработка сигналов и ее применение DSPA – 2023. Доклады XXV Международной конференции. Москва, 2023. – С. 187-192.
21. Медиевский А.В., Зотин А.Г., Симонов К.В., Круляков А.С. Технология визуализации интересующих биологических тканей в момент интраоперационного кровоизлияния В книге: Марчуковские научные чтения - 2022. Сборник Тезисов Международной конференции . Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН. – 2022. – С. 127.
22. Arena F., Pau G., Severino A. An overview on the current status and future perspectives of smart cars // *Infrastructures*. – 2020. – vol. 5. – no. 7. – article 53. DOI: 10.3390/infrastructures5070053.
23. Kamenskiy A.V. (2022) High-speed recursive-separable image processing filters // *Computer Optics*. – Vol. 46. – № 4. – P. 659-665.
24. Применение методов улучшения контрастности при обработке спутниковых снимков Губин Д.И., Мистратов Н.Ю. В сборнике: Актуальные проблемы авиации и космонавтики. сборник материалов VIII Международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики: в 3 т. Красноярск, 2022. – С. 120-122.
25. Шапиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 752 с.
26. Vostrikov A., Sergeev M., Balonin N., Chernyshev S. B (2017) Digital masking using mersenne matrices and their special images. *Procedia Computer Science. Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems: Proceedings of the 21st International Conference, KES 2017*. – P. 1151-1159.
27. Востриков А.А., Сергеев М.Б., Литвинов М.Ю. Маскирование цифровой визуальной информации: термин и основные определения// *Информационно-управляющие системы*. – 2015. – № 5 (78). – С. 116-123. doi:10.15217/issn1684-8853.2015.5.116
28. Михайлов В.В., Колпашиков Л.А., Соболевский В.А., Соловьев Н.В., Якушев Г.К. Методологические подходы и алгоритмы распознавания и подсчета животных на аэрофотоснимках // *Информационно-управляющие системы*. – 2021. – № 5 (114). – С. 20-32. doi:10.31799/1684-8853-2021-5-20-32.
29. Подгорнова Ю.А., Жизняков А.Л., Садыков С.С. Повышение контраста маммограмм, содержащих области рака молочной железы, на фоне жировой инволюции // *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии*. – 2020. – № 2 (50). – С. 136-147.
30. Подгорнова Ю.А., Садыков С.С., Самандаров И.Р., Воронцов С.А. Исследование критериев распознавания доброкачественных заболеваний на маммограммах. В сборнике: Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов и обработки изображений. Материалы XVI Международной научно-технической конференции. Редколлегия: С.Г. Емельянов, В.С. Титов (отв. ред.) [и др.]. Курск, 2021. – С. 279-281.
31. Podgornova Yu.A., Sadykov S.S. Comparative analysis of segmentation algorithms for the allocation of microcalcifications on mammograms // *CEUR Workshop Proceedings. ITNT 2019 Proceedings of the 5th Information Technology and Nanotechnology 2019: Image Processing and Earth Remote Sensing*. – P. 122-127.
32. Куприянов В.В., Бондаренко И.С. Логико-вероятностные методы моделирования сценариев аварий в шахтах // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2023. – № 7. – С. 114-131. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_7_0_114.
33. Грузман И.С. и др. Цифровая обработка изображений в информационных системах. Новосибирск: НГТУ, 2000. – 156 с.
34. Сергеев М.Б., Соловьев Н.В., Стадник А.И. Методы повышения контрастности растровых изображений для систем цифровой обработки видеoinформации // *Информационно-управляющие системы*. – 2007. – № 1 (26). – С. 2-7.
35. Захлебн А.С., Калибеков А., Курячий М.И. Построение геопривязанного ортофотоплана участка местности по изображениям с телевизионной камеры бпла вертолетного типа // *Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции*. – 2020. – № 1-2. – С. 187-189.
- Статья поступила в редакцию 30.01.2024
Статья принята к публикации 15.03.2024

УДК 378.162.33, 616-71, 621.373

EDN: SBVWKK

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИМИТАЦИИ КАРДИОСИГНАЛОВ В УЧЕБНОМ РОБОТЕ-ТРЕНАЖЕРЕ

© Автор(ы) 2024

SPIN: 1222-5399

AuthorID: 517750

ORCID: 0000-0003-0933-1212

ResearcherID: P-2232-2015

ScopusID: 7004205146

ЧУЛКОВ Валерий Александрович, доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Биомедицинская инженерия»

Пензенский государственный технологический университет

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

SPIN: 2235-1054

AuthorID: 564853

ORCID: 0000-0003-1387-2580

ResearcherID: N-3517-2018

ScopusID: 40462363600

СЕРЖАНТОВА Наталья Александровна, кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Биомедицинская инженерия»

Пензенский государственный технологический университет

(440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11, e-mail: itmmbpsgta@yandex.ru)

Аннотация. В учебном процессе при подготовке специалистов медико-технического профиля огромную роль играет приобретение ими практических навыков диагностического обследования пациентов, среди методов диагностики первостепенное значение имеет снятие кардиосигналов с помощью электрокардиографа. Медик должен знать места установки электродов на теле пациента и разбираться в основных показателях нарушения сердечной деятельности, проявляющихся на кардиограмме. Эту задачу призваны решать учебные медицинские тренажеры, среди основных функций которых предусмотрено физическое моделирование кардиосигналов. Рынок медицинских приборов насыщен роботами-тренажерами, способными воспроизводить различные эффекты жизнедеятельности организма, однако все они отличаются высокой стоимостью и сложностью технического обслуживания. В настоящей работе предлагается схема простого имитатора кардиосигналов на основе постоянного запоминающего устройства (ПЗУ), хранящего приведенные к заданному формату оцифрованные сигналограммы, характерные для нормального и патологических состояний сердца. Устройство рассчитано на генерирование восьми сигналограмм, однако его возможности несложно расширить путем увеличения емкости памяти.

Ключевые слова: генератор, тактовая частота, кардиосигнал, постоянное запоминающее устройство, базовая линия сигналограммы, интегральная микросхема.

DEVICE FOR SIMULATING CARDIO SIGNALS IN A TRAINING SIMULATOR

© The Author(s) 2024

CHULKOV Valery Alexandrovich, doctor of technical sciences, associate professor,
head of the Department of Biomedical Engineering

Penza State Technological University

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

SERZHANTOVA Natalya Aleksandrovna, candidate of technical sciences,
associate professor of the department of Biomedical Engineering

Penza State Technological University

(440039, Penza, Baydukov passage / Gagarinastreet, 1a / 11, e-mail: itmmbpsgta@yandex.ru)

Abstract. In the educational process when training medical and technical specialists, a huge role is played by their acquisition of practical skills in diagnostic examination of patients. Among diagnostic methods, the acquisition of cardiac signals using an electrocardiograph is of paramount importance. The physician must know where the electrodes are installed on the patient's body and understand the main indicators of cardiac dysfunction that appear on the cardiogram. Medical training simulators are designed to solve this problem, the main functions of which include physical modeling of cardiac signals. The medical device market is saturated with robotic simulators capable of reproducing various effects of the body's vital functions, but they are all characterized by high cost and complexity of maintenance. This work is devoted to the development of a simple simulator of cardiac signals based on a read-only memory device that stores digitized signalograms, reduced to a given format, characteristic of normal and pathological conditions of the heart. The device is designed to generate eight signalograms, but its capabilities can be easily expanded by increasing the memory capacity.

Keywords: generator, clock frequency, cardiac signal, read-only memory, signalgram baseline, integrated circuit.

Для цитирования: Чулков В.А. Устройство для имитации кардиосигналов в учебном роботе-тренажере / В.А. Чулков, Н.А. Сержантова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 1(65). – С. 18-24. – EDN: SBVWKK.

Введение. Развитие в последние десятилетия информационных технологий, микроэлектронных систем и датчиковой аппаратуры, обеспечивающих визуализацию с высоким разрешением внутренних структур живых организмов, стимулировало разработку роботизированных платформ диагностики заболеваний и лечебных воздействий в медицине [1-5]. При этом все более реальные черты приобретают перспективы использования в медицинской практике нанороботов [6, 7], способных вывести сложные терапевтические процедуры и хирургические операции на полностью автоматизированный неинвазивный уровень.

К настоящему времени создано огромное количество роботов-симуляторов для практического обучения медицинского персонала способам диагностических исследований и лечебных процедур [8-13]. Их использование обладает рядом достоинств по сравнению с обучением на реальных пациентах: имеется возможность программирования симулятора для выполнения конкретных манипуляций с многократным повторением, исключаются риски травмирования пациента, учебное время не ограничена рамками клинического расписания.

Отдельную группу симуляторов составляют устройства для привития широкому кругу лиц навыков оказания первой немедицинской помощи, в том числе при обострении заболевания и в экстренных ситуациях для реанимации пострадавших. Если среди многофункциональных сложных симуляторов хирургического назначения на российском рынке преобладают изделия зарубежного производства, такие как известная хирургическая система *Da Vinci*, то относительно простые тренажеры для оказания первой помощи выпускаются множеством отечественных компаний [14-17].

Хотя область медицинской робототехники развивается очень быстрыми темпами, трудно ожидать появления достаточно простых и бюджетных имитаторов жизнедеятельности организма, ориентированных на использование в учебном процессе по программам биомедицинской инженерии при практическом освоении студентами дисциплин, связанных с проектированием и применением медицинских приборов. Прежде всего, для этого необходимы имитаторы сердечной деятельности и дыхательной активности человека, позволяющие воспроизвести наиболее важные характеристики его состояния и ознакомиться на этой основе с принципами действия и устройством электрокардиографа, стетоскопа, тонометра, спирометра и пр.

Целью настоящей работы является обоснование номенклатуры генерируемых кардиосигналов и

методики преобразования сигналов из базы медицинских данных для записи в память учебного медицинского тренажера, выбор структуры и разработка принципиальной схемы имитатора кардиосигналов.

Методология. Схемотехника имитаторов кардиосигналов, способных воспроизводить электрические колебания, сопровождающие сердечную деятельность (кардиограммы) и оценивать работоспособность электрокардиографов сочетает аналоговые и цифровые способы формирования электрических колебаний. Принцип действия аналоговых устройств, построенных полностью на дискретных элементах [18-20], основан на параметрическом синтезе формы сигнала. Такие имитаторы отличаются сложностью структуры, требуют многочисленных регулировок, не обеспечивают достаточной точности воспроизведения формы кардиоимпульсов. Функциональные возможности аналоговых устройств ограничены ввиду невозможности воспроизведения множества сигналограмм, характерных для различных состояний сердечной мышцы.

В цифровых устройствах для генерирования кардиосигналов оцифрованные их образцы хранятся в постоянном запоминающем устройстве (ПЗУ), откуда они по тактам извлекаются в процессе перебора адресов его ячеек памяти, для образования электрической кардиограммы используется цифроаналоговый преобразователь. Такие имитаторы часто используются для проверки функционирования и диагностирования неисправностей кардиоаппаратуры, в качестве генератора тестовых сигналов они могут применяться и для метрологической проверки электрокардиографа [21-23]. Обычно управление подобным устройством (по сути системой) с программной установкой варианта сигналограммы, ее тактовой частоты и амплитудных параметров управляет компьютер или микроконтроллер, что не всегда приемлемо при создании автономного портативного учебного тренажера. Кроме того, на точности генерируемого кардиосигнала может сказываться возможное смещение его базовой (нулевой) линии под воздействием дестабилизирующих факторов.

Приведенные основания позволяют представить структуру имитатора кардиосигналов в виде, показанном на рисунке 1, ядро которой представляет ПЗУ (ROM), адреса которого циклически перебирает k -разрядный двоичный счетчик импульсов (СТ) по тактам, задаваемым генератором G . Область памяти ПЗУ объемом $2^k \times n$ назначается m -разрядным двоичным кодом номера образца кардиосигнала. Заданный образец кардиосигнала образуется на

выходе цифроаналогового преобразователя (D/A), далее он передается на выход через аттенюатор.

Остальные блоки устройства служат для стабилизации базовой линии сформированной кардиограммы на уровне операционной «земли». Такая стабилизация необходима уже потому, что выходное напряжение цифроаналогового преобразователя на основе матрицы $R-2R$ однополярное, в то время как формируемый кардиосигнал имеет биполярную природу. Кроме того его базовая линия даже в исходном виде в

базе медицинских данных и ввиду различных искажающих воздействий может отличаться от нуля. С учетом этого базовая линия всех хранимых образов кардиосигнала в ПЗУ смещена в центр диапазона к уровню 2^{n-1} , а размах кардиосигнала в цифровом исчислении приведен к диапазону от 0 до $(2^n - 1)$. Таким образом, все отсчеты ПЗУ суть положительные числа, выходное напряжение цифроаналогового преобразователя можно также сделать положительным при соответствующем выборе опорного напряжения.

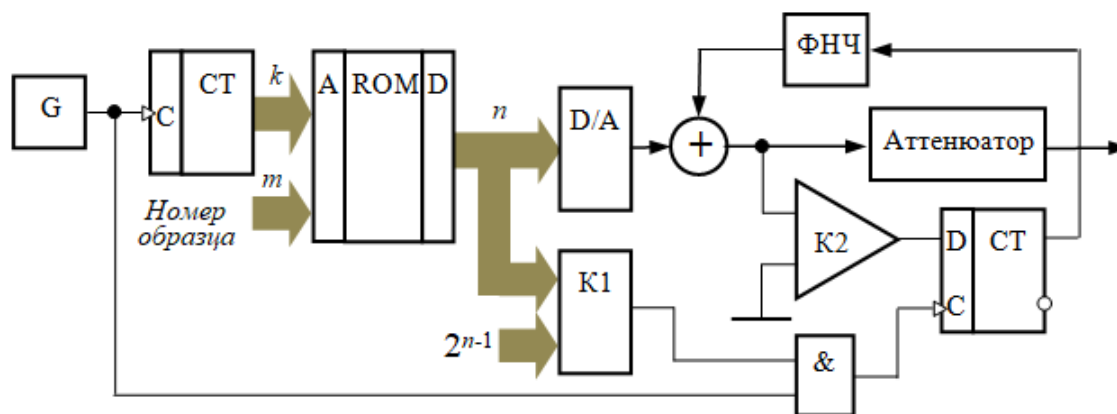


Рисунок 1 – Структура имитатора кардиосигналов

Для автоматического приведения базовой линии сигнала к нулевому уровню в устройство введены цифровой компаратор $K1$ и аналоговый компаратор $K2$, первый из них срабатывает в моменты, когда выводимое из ПЗУ число становится равным среднему значению 2^{n-1} , а второй непрерывно сравнивает поступающее на аттенюатор напряжение с уровнем операционной «земли». Кроме компараторов в устройстве дополнительно предусмотрен суммирующий узел, с помощью которого к сигналу цифроаналогового преобразователя добавляется компенсирующее напряжение, поступающее с выхода D -триггера через усредняющий фильтр нижних частот (ФНЧ).

Автоподстройка осуществляется в следующем порядке. В тех тактах, когда из ПЗУ выводится число 2^{n-1} , компаратор $K1$ разрешает прохождение тактового импульса генератора через вентиль И на синхровход D -триггера, который фиксирует текущий уровень напряжения аналогового компаратора $K2$, отражающий отклонение базового уровня сигналаграммы от нуля. В зависимости от знака отклонения выходное напряжение ФНЧ получает приращение того или иного знака, способствующее компенсации отклонения, добавляясь к сигналу цифроаналогового преобразователя в суммирующем узле. В итоге через достаточное время базовая линия генерируемого кардиосигнала становится точно равной нулю. Далее сигнал ослабляется аттенюатором до требуемой амплитуды в несколько милливольт, характерной для сигнала на электроде, и поступает на

выход устройства.

Важное значение имеет выбор номенклатуры генерируемых кардиосигналов, соответствующих норме и наиболее значимым патологиям сердечной деятельности. В литературе имеется множество публикаций по форме кардиосигнала в различных состояниях человека и по методикам их расшифровки [24-27]. Поскольку описываемый имитатор предназначен для учебных целей и ориентирован на будущих инженеров в области медицинской техники, в задачи которых не входит профессиональная интерпретация результатов исследования, то признано возможным ограничиться несколькими формами кардиосигнала, характерные признаки которых приведены в таблице 1 [28].

В качестве исходных данных использованы дискретизированные по времени сигналы из базы *ANA Database Sample Excluded Record* [29] – протяженности каждой сигналаграммы 6 секунд соответствуют 1024 отсчета. Кардиограммы соответствуют сигналам, снятым непосредственно электродами, они представляют собой изменения напряжения (мВ) во времени, базовые линии сигналов могут быть смещены относительно нуля. Число уровней квантования при оцифровке кардиограмм принято равным 256 (8-разрядные двоичные числа), что обеспечивает погрешность 0,4%. Предварительно средствами программы *Excel* базовые линии исходных сигналаграмм смещены к нулевому уровню, после этого они приведены к диапазону ($D_{min}=0$, $D_{max}=255$) по формуле:

$$d_n = \frac{D_{\max}}{\Delta U} u_n,$$

где d_n – текущее (n -ое) значение цифрового отсчета, ΔU – размах шкалы исходной кардиограммы,

u_n – текущее (n -ое) значение кардиосигнала. Очевидно, что нулю оцифрованного сигнала будет соответствовать значение $d_{cp} = D_{\max} / 2 = 127,5$ (целое число 127), что следует учесть при формировании выходного напряжения.

Таблица 1 – Характерные признаки форм кардиосигнала

№	Наименование	Характерные признаки
1	Норма	нулевая базовая линия; маленький зубец Р – продолжительность 0,7 ... 0,12 с; небольшой ровный сегмент PQ; отрицательный зубец Q (может отсутствовать) – продолжительностью 0,03 с; положительный зубец R амплитудой в 40 – 50 раз больше отрицательного зубца S; ровный сегмент ST; округлый положительный зубец Т продолжительностью 0,12-0,28 с. и амплитудой не более четверти зубца R; очень низкий округлый положительный зубец U; продолжительности интервалов: P-Q – 0,2 ... 0,8 с, P-R – 0,18 ... 0,2 с, QRST – 0,38 ... 0,55 с, QRS – 0,06 ... 0,1 с, S-T – 0,35 ... 0,44 с
2	Мерцательная аритмия	отсутствие регулярных волн Р; хаотические волны между комплексами QRS.
3	Тахикардия	увеличение частоты сердечных сокращений с регулярными QRS-комплексами; узкий комплекс QRS.
4	Брадикардия	увеличение интервала R-R; расширение комплексов QRS; увеличение длительности PR-интервала; снижение частоты сердечных сокращений.
5	Тригеминия	правильное чередование экстрасистол и нормальных сокращений (каждый второй комплекс является экстрасистолой).
6	Бигеминия	правильное чередование экстрасистол и нормальных сокращений (каждый третий комплекс – экстрасистола).
7	Фибрилляция	отсутствие организованных Р-зубцов; беспорядочные QRS-комплексы; увеличение частоты сердечных сокращений; наличие волн фибрилляции (F-волны).
8	Экстрасистолия	раннее появление Р-волны; отсутствие PR-интервала или R-волны; компенсаторная пауза.

Результаты. Описанная процедура обработки кардиограммы типа «норма» с последующей ее оцифровкой для записи в ПЗУ и воспроизведения с помощью цифроаналогового преобразователя иллюстрируется рисунком 2. Колебания кардиосигнала происходят относительно средней (базовой) линии, близкой к нулю, его протяженность во времени составляет 6 с, а шкала напряжения простирается от –3 мВ до +3 мВ. Оцифрованная сигналограмма представлена 1024 отсчетами от 0 до 1023, цифровые значения отсчетов укладываются в шкалу от 0 до 255, центр этой шкалы приходится на значение 127. Заметим, что в двоичной системе счисления предел шкалы равен восьмизначному числу $2^n - 1 = 11111111$, центру шкалы соответствует целочисленное значение $(2^n - 1) / 2 = 01111111$.

В соответствии со структурой устройства (рис. 1) построена принципиальная схема, ядро которой изображено на рисунке 3. Схема состоит из опорного генератора частотой 2720 Гц на микросхеме таймера K1006ВИ1 ($D1$), нагруженного на 14-разрядный счетчик импульсов $D2$ типа K561ИЕ16. Десять старших разрядов счетчика используются для задания адреса ПЗУ ($D3$), а младшие разряды служат для деления опорной частоты генератора до необходимой тактовой частоты имитатора 170 Гц. Тактовая частота (частота дискретизации) определяется величиной,

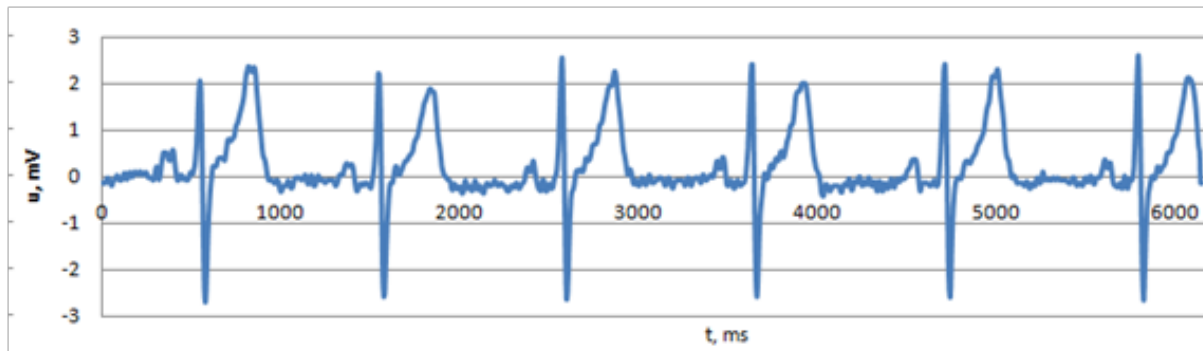
обратной длительности такта, который равен отношению временной протяженности кардиограммы 6 секунд к числу отсчетов 1024. ПЗУ KC573РФ4 ($D3$) с информационной емкостью $8K \times 8$ хранит цифровые образы восьми кардиограмм, мгновенные значения которых по тактам передаются на цифроаналоговый преобразователь $D5$ (модель K572ПА1А) у которого задействованы младшие 8 входов, что при опорном напряжении –5 В обеспечивает на выходе операционного усилителя $D7$ напряжение от 0 до +1,25 В (без участия в работе цепи автоподстройки базовой линии). В задачу выходного пассивного аттенуатора, включающего потенциометр $R7$ и конденсатор $C3$ входит регулируемое ослабление и сглаживание ступенчатого напряжения цифроаналогового преобразователя.

Остальные узлы структуры в принципиальной схеме служат для автоматического приведения базовой линии выходного кардиосигнала к нулю. Роль цифрового компаратора $K1$ выполняет вентиль $I1$ с инвертором ($D4$), которые в тактах, когда из ПЗУ выводится число 01111111 (127), пропускают импульсы опорного генератора на синхровход триггера $D6$, фиксирующего в эти моменты результат сравнения выходного напряжения (до аттенуатора) с уровнем операционной земли компаратором $D8$. Широтно-модулированные импульсы триггера ус-

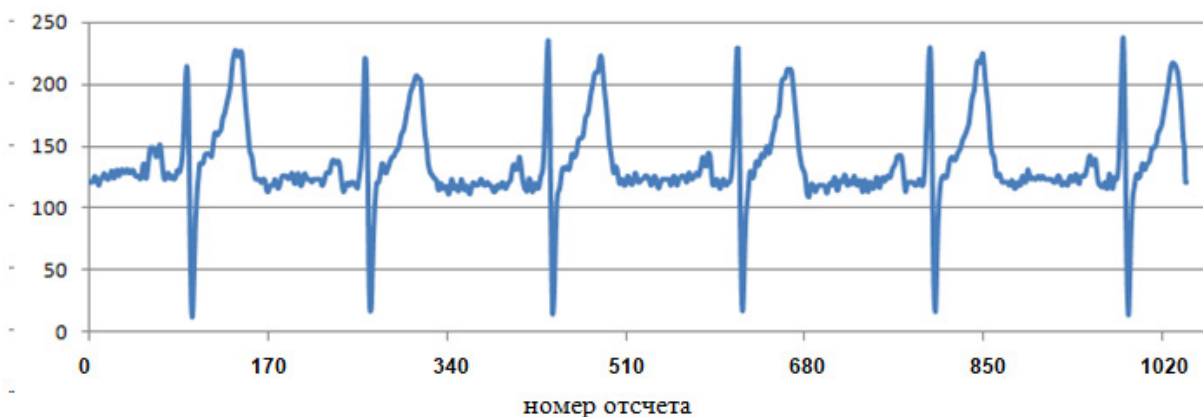
редняются фильтром $R5, C2$, результат усреднения через резистор $R4$ добавляется к итоговому выходному напряжению в направлении приближения базовой линии к нулю

На рисунке 4 показана осциллограмма выход-

ного напряжения устройства для случая «нормы». Сравнение осциллограммы с исходными сигналами (рис. 2) показывает их совпадение, базовая линия удерживается близкой к нулевому уровню.

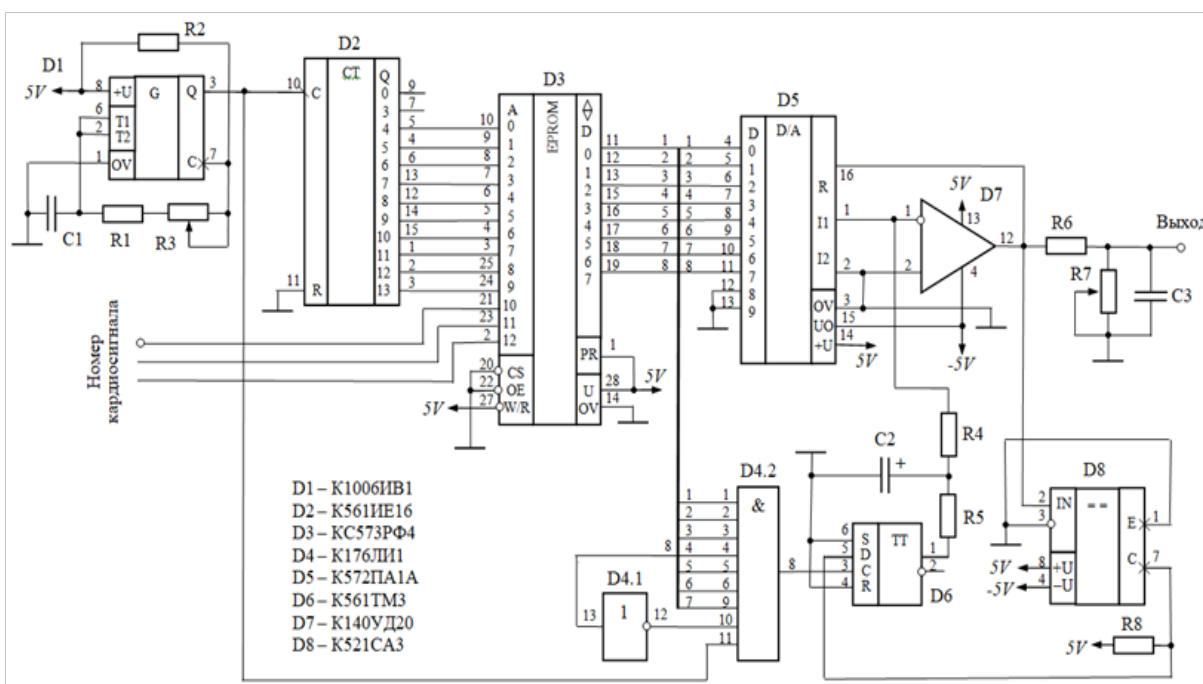


а)



б)

Рисунок 2 – Кардиограмма «в норме» до (а) и после (б) преобразования



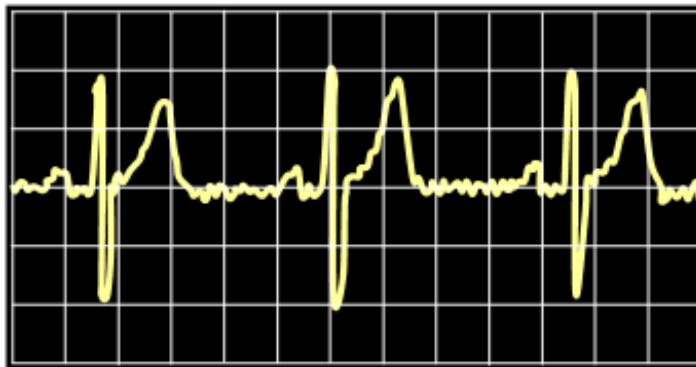


Рисунок 4 – Осциллограмма выходного напряжения: развертка по горизонтали 1 мВ/дел, по вертикали 0,2 с/дел

Обсуждение. Стабилизация базового уровня имитируемой кардиограммы позволяет повысить точность ее воспроизведения в отличие от простой гальванической развязки выхода генератора с помощью разделительного конденсатора, которой свойственно динамическое накопление заряда и смещение среднего уровня в соответствии с соотношением площадей полуоволн противоположных полярностей. Идея заключается в том, что выделяются промежутки времени, в которые кардиосигнал должен принимать нулевое значение, и корректировка базового уровня сигнала в направлении компенсации его отклонения от нуля. В предложенном варианте устройства стабилизация достигается простыми средствами без участия оператора и/или персонального компьютера.

Разработанный автономный имитатор кардиосигналов построен на небольшом числе интегральных схем, использование КМОП микросхем обеспечивает низкое энергопотребление при питании от пары источников постоянного напряжения +5 В и –5 В. Схема ориентирована на использование в портативном учебном оборудовании для практического обучения студентов.

Выводы. В учебном процессе при подготовке специалистов по медицинской технике и системам овладение навыками и их закрепление нуждается в наличии пациента, на котором тестируется оборудование. Благодаря успехам техники и технологий в настоящее время появилась возможность замещения в учебных целях живого организма его виртуальным либо механическим аналогом. Среди методов диагностики первостепенное значение имеет снятие и интерпретация сигналов сердечной деятельности с помощью электрокардиографа, для чего необходимо адекватное физическое моделирование кардиосигналов, снимаемых с помощью электродов. Имитатор кардиосигналов, встраиваемый в структуру учебного медицинского тренажера, обязан быть автономным, простым в использовании и маломощным. В порядке решения этой задачи предложена схема имитатора кардиосигналов на основе ПЗУ, хранящего приведенные к заданному формату оцифрованные сигналограммы, характерные для нормального и патологических состояний сердца.

Отличие имитатора от подобных устройств состоит в повышенной точности воспроизведения реальных кардиосигналов в учебном тренажере благодаря автоматической стабилизации из базовых уровней. Устройство рассчитано на генерирование восьми сигналограмм, однако его возможности несложно расширить путем увеличения емкости памяти.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Ginoya, T.A Historical Review of Medical Robotic Platforms / T. Ginoya, Y. Maddahi, K. Zareinia // Journal of Robotics. – Volume 2021, Article ID 6640031. – P. 1 – 13. – См. также [Электронный ресурс] Режим доступа: URL <https://www.hindawi.com/journals/jr/2021/6640031/> (дата обращения 16.02.2024).
2. Olfa Boubaker. Medical and Healthcare Robotics: New Paradigms and Recent Advances (Medical Robots and Devices: New Developments and Advances). – Tunisia, Elsevier Inc. – 2023 – 298 p., eBook ISBN: 9780443184611. – См. также [Электронный ресурс] Режим доступа: URL <https://booksclub.online/book/fmilEAAQBAJ/medical-and-healthcare-robotics/olfa-boubaker/elsevier/300/2023-08-01/9780443184611/technology-engineering> (дата обращения 16.02.2024).
3. Alex Khang. Medical Robotics and AI-Assisted Diagnostics for a High-Tech Healthcare Industry Book. – IntechOpen. – 2024. – 166 p. – Paperback ISBN: 9780443184604, eBook ISBN: 9780443184611. [Электронный ресурс] Режим доступа: URL <https://shop.elsevier.com/books/medical-and-healthcare-robotics/boubaker/978-0-443-18460-4> (дата обращения 16.02.2024).
4. Dwivedi, J. Robotic Surgery – A Review on Recent advances in Surgical Robotic Systems / Jyotsna Dwivedi, Imad Mahgoub // 2012 Florida Conference on Recent Advances in Robotics. Boca Raton, Florida, May 10-11, 2012. – P. 1-7. – См. также [Электронный ресурс] Режим доступа: URL https://www.researchgate.net/publication/268408467_Robotic_Surgery_-_A_Review_on_Recent_advances_in_Surgical_Robotic_Systems (дата обращения 16.02.2024).
5. Beasley R.A. Medical Robots: Current Systems and Research Directions / Ryan A. Beasley // Journal of Robotics. – Volume 2012, Article ID 401613. P. 1 – 14. См. также [Электронный ресурс] Режим доступа: URL <https://www.hindawi.com/journals/jr/2012/401613/> (дата обращения 16.02.2024).
6. Fernando Soto, Robert Chrostowski. Frontiers of Medical Micro/Nanorobotics: in vivo. Applications and Commercialization. Perspectives Toward Clinical Uses. [Электронный ресурс] Режим доступа: URL <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbioe.2018.00170/full> (дата обращения 16.02.2024).
7. Чехонин, В.П. Перспективы применения нанобиотехнологий в медицине / В.П. Чехонин, В.А. Меркулов, Д.А. Кузнецов, А.А. Петров, А.С. Павлюк // Вестник РГМУ. – 2009. – № 1. – С. 7-11.
8. Медицинские роботы-симуляторы. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL <http://www.mforum.ru/news/article/114172.htm> (дата обращения 16.02.2024).
9. Бойко Алексей. Роботы-тренажеры для обучения врачей. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL <https://>

robotrends.ru/roboptedia/roboty-trenazhery-dlya-obucheniya-vrachyau (дата обращения 16.02.2024).

10. Набраться опыта: как современные манекены помогают врачам. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL <https://chudo.tech/2023/11/26/manekeny-pomogayut-vracham/> (дата обращения 16.02.2024).

11. Cao C.G.L. Increasing Accessibility to Medical Robotics Education / Caroline G.L. Cao, Ethan Danahy // IEEE Conference: Technologies for Practical Robot Applications (TePRA), 2011. – P. 49-53. – См. также [Электронный ресурс] Режим доступа: URL https://www.researchgate.net/publication/224230909_Increasing_accessibility_to_medical_robotics_education (дата обращения 16.02.2024).

12. Naik, R. Robotic simulation experience in undergraduate medical education: a perspective. / R. Naik, I. Mandal // J. Robot Surg. – 2020 Oct. – №14(5). – P. 793-794. – См. также [Электронный ресурс]. URL <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32125601/> (дата обращения 15.02.2024).

13. Уханов, М.М. Применение роботов в стоматологии. Часть 1. Роботассистированные системы для обучения студентов-стоматологов и специалистов / М.М. Уханов, А.В. Ивашенко, И.М. Федяев, А.Е. Яблоков, И.Н. Колганов, В.П. Тлустенко // Российский стоматологический журнал. – 2018. – № 22(6). – С. 314-324.

14. Особенности медицинского манекена человека, типы анатомических моделей. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL <https://zarnitza.ru/press-center/blog/osobennosti-meditsinskogo-manekena-cheloveka-tipy-anatomicheskikh-modely/> (дата обращения 16.02.2024).

15. Медицинское учебное оборудование производственного объединения «Зарница». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL <https://zarnitza.ru/catalog/meditsina/> (дата обращения 16.02.2024).

16. Медицинское учебное оборудование компании НТИЦ «Решение». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL <https://nticreshenie.ru/cat/medicinskie-manekeny-trenazhery/?yclid=11626458315184144383> (дата обращения 16.02.2024).

17. Дудырев, Ф.Ф. Симуляторы и тренажеры в профессиональном образовании: педагогические и технологические аспекты / Ф.Ф. Дудырев, О.В. Максименкова // Вопросы образования/Educational Studies Moscow. – 2020. – № 3. – С. 255-276. – См. также [Электронный ресурс] Режим доступа: URL <https://publications.hse.ru/pubs/share/direct/414450961.pdf> (дата обращения 16.02.2024).

18. Имитатор кардиосигналов. Авторское свидетельство СССР 738603, М.Кл. А61 В 5/02, F61 Н 31/00, опубл. 05.06.1980.

19. Шустов М. Эмулятор сигналов кардиографа [Электронный ресурс]. – Режим доступа URL <https://www.glosman.ru/shem/schematics.html?di=642353> (дата обращения 12.12.2023).

20. Генератор кардиоимпульсов. Патент РФ 2682987, МПК G09B 23/28, опубл. 25.03.2019.

21. Подмастерьев К.В. Генератор тестовых сигналов для проверки и сертификационных испытаний электрокардиоаппаратуры / К.В. Подмастерьев, А.В. Козюра // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2010. – № 1. – С. 82-87. [Электронный ресурс].

22. Рафиков Р.А. Биоэлектричество и медицинская электроника: учеб. пособие / Р.А. Рафиков; Ряз. гос. радиотехн. акад. – Рязань: Изд-во РГРТА, 2005. – 104 с.

23. Федотов, А.А. Имитатор электрокардиосигнала для проверки интерпретирующих электрокардиографов / А.А. Федотов // XV Королевские чтения [Электронный ресурс]: междунар. молодеж. науч. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения Д. И. Козлова: сб. тр.: 8-10 окт. 201 / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Самар. нац. исслед. ун-т им. С. П. Королева (Самар. ун-т) ; науч. ред. М. А. Шлеенков. – 2019. – Т. 1. – С. 421-422.

24. Зайченко К.В., Жаринов О.О., Кулин А.Н., Кулыгина Л.А., Орлов А.П. Съем и обработка биоэлектрических сигналов: Учеб. пособие / Под ред. К. В. Зайченко. – СПб, . СПбГУАП. – 2001. – 140 с.

25. Расшифровка ЭКГ: наиболее важные показателями кардиограммы с примерами нарушений. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа URL <https://unclinic.ru/rasshifrovka-jekg-naibolee-vazhnye-pokazateli-kardiogrammy-s-primerami-narushenij/> Разберем различные виды аритмий (дата

обращения 12.12.2023).

26. Аритмии сердца. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа URL <https://meduniver.com/Medical/cardiologia/4a.html> (дата обращения 25.02.2024).

27. ЭКГ: как определяется болезнь на ЭКГ, расшифровка результатов. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа URL <https://spb.meds.ru/articles/ekg-kak-opredelyaetsya-bolezn-na-ekg-rasshifrovka-rezultatov/> (дата обращения 25.02.2024).

28. Полякова О.В. Арабидзе Г.Г. Алгоритмы ЭКГ диагностики. Учебное пособие для студентов. – М.: МГМСУ, 2020. – 90 с.

29. AHA Database Sample Excluded Record. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа URL <https://physionet.org/content/ahadb/1.0.0/> (дата обращения 25.02.2024).

Статья поступила в редакцию 24.02.2024

Статья принята к публикации 15.03.2024

УДК 69.004

EDN: QRHCSK

ТЕХНОЛОГИИ ИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КАК ИНСТРУМЕНТ ЦИФРОВИЗАЦИИ СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

© Автор 2024

SPIN: 2641-8604

AuthorID: 946541

ORCID: 0000-0003-1940-1552

ГУСАРОВА Алла Александровна, аспирант

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, дом 26, e-mail: 2609gaa@gmail.com)*

Аннотация. Целью данной статьи является исследование и анализ технологий информационного моделирования в контексте их роли в цифровизации строительной отрасли. Информационное моделирование представляет собой ключевой инструмент для автоматизации процессов инвестиционно-строительных проектов, способствуя повышению эффективности, оптимизации ресурсов, улучшению качества проектирования и управлению жизненным циклом объектов строительства. В рамках исследования были рассмотрены методы и подходы, используемые в информационном моделировании для цифровизации строительной отрасли. Особое внимание уделено анализу применения *BIM* (*Building Information Modeling*), его влияния на процессы проектирования, строительства, эксплуатации и утилизации объектов и существующим проблемам. Результаты исследования представляют собой обобщение и систематизацию современных подходов к использованию технологий информационного моделирования в строительной отрасли. Исследование позволило выделить ключевые аспекты, способствующие улучшению процессов в контексте цифровизации строительной области, текущих проблем и предложить варианты их решения. Исследование выводит на повестку дня важность интеграции информационного моделирования в сферу строительства в контексте цифровизации, предлагая практические методы и рекомендации для оптимального использования технологий информационного моделирования в современной строительной отрасли.

Ключевые слова: технологии информационного моделирования, ТИМ, *Building Information Modeling*, *BIM*, цифровизация, инвестиционно-строительный проект, *SMART*-стандарты, ЦИМ, информационные технологии, объект капитального строительства.

INFORMATION MODELING TECHNOLOGIES AS A TOOL FOR DIGITIZATION OF THE CONSTRUCTION INDUSTRY

© The Author 2024

GUSAROVA Alla Alexandrovna, post-graduate student

*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)
(432700, Russia, Moscow, Yaroslavlshoe Shosse, 26, e-mail: e-mail: 2609gaa@gmail.com)*

Abstract. The purpose of this article is to study and analyze information modeling technologies in the context of their role in the digitalization of the construction industry. Information modeling is a key tool for automating the processes of investment and construction projects, helping to increase efficiency, optimize resources, improve design quality and manage the life cycle of construction projects. The study examined methods and approaches used in information modeling for digitalization of the construction industry. Particular attention is paid to the analysis of the use of *BIM* (*Building Information Modeling*), its impact on the processes of design, construction, operation and disposal of objects and existing problems. The results of the study will represent a generalization and systematization of modern approaches to the use of information modeling technologies in the construction industry. The study made it possible to identify key aspects that contribute to improving processes in the context of digitalization of the construction field, current problems and propose options for solving them. The study highlights the importance of integrating information modeling into the construction industry in the context of digitalization, offering practical methods and recommendations for the optimal use of information modeling technologies in the modern construction industry.

Keywords: information modeling technologies, TIM, *Building Information Modeling*, *BIM*, digitalization, investment and construction project, *SMART* standards, DIM, information technology, capital construction project.

Для цитирования: Гусарова А.А. Технологии информационного моделирования как инструмент цифровизации строительной отрасли / А.А. Гусарова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 1(65). – С. 25-34. – EDN: QRHCSK.

Введение. Сфера строительства в настоящее время сталкивается с необходимостью эффективного управления процессами инвестиционно-строительных проектов, обеспечивая высокий уровень

качества, оптимизацию ресурсов и снижение затрат. Это подтверждает утвержденная Стратегия развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства до 2030 года [1].

На данный момент существуют различные современные технологии, которые внедряются в сфере строительства. Одним из перспективных решений становится применение технологий информационного моделирования (ТИМ), которые влияют на все этапы жизненного цикла строительных объектов. Применение *BIM* (*Building Information Modeling*) и других современных подходов к информационному моделированию представляет собой ключевой фактор цифровизации строительной отрасли. Информационное моделирование позволяет формировать данные об объекте управления в виде систематизированных сведений, которые могут быть использованы в различных бизнес-процессах и при применении других технологий.

Анализ последних исследований (Шестаков К.И., Соколов И.М., Пирогов М.А., Соловьев С.Г. [2], Мирошкин Н.В [3], и др.[4, 5]) показывает, что технологии информационного моделирования активно внедряются в сферу строительства, однако, все еще существует необходимость в комплексном анализе их внедрения и влияния на процессы управления и планирования строительства, а также в выделении неразрешенных частей общей проблемы, таких как потребности в формировании и корректировка нормативной базы с учетом особенностей цифровизации строительства, потребности в улучшении взаимодействия между участниками проекта, оптимизация стоимости проектов и повышение

эффективности управления жизненным циклом зданий.

В текущее время *BIM* используется для создания цифровой информационной модели (трёхмерной модели) объекта капитального строительства (ЦИМ) на этапе проектирования, так как для совместного взаимодействия проектной группы, автоматизации работы проектировщиков и визуализации проектных решений *BIM* доказал свою эффективность. Однако, на этапе строительства практика применения *BIM* не так распространена. Таким образом, сейчас ЦИМ используется для формирования проектной документации (проектной, рабочей и исполнительной) [6]. Но потенциал этой технологии значительно больше. Одним из возможных вариантов применения ЦИМ (рис. 1) является её использование в качестве общей базы данных об объекте, вместо проектной и иной документации, в той степени, в которой это является целесообразным. Цифровое представление объекта позволяет автоматизировать процессы, связанные с его управлением в части экспертизы, различных проверок, контроля и управления процессами строительно-монтажных работ (СМР), строительного контроля, эксплуатации и т.д. Реализация данного варианта развития представляет собой достаточно сложную задачу, так как требует изменения бизнес-процессов внутри реализации инвестиционно-строительных проектов и изменения части нормативной базы в строительной области.



Рисунок 1 – Обобщенная схема процессов на разных этапах жизненного цикла объекта капитального строительства

важен непрерывный обмен и актуализация данных об объекте, так как на основе актуальных данных возможен качественный анализ для принятия наиболее эффективных решений. Обычно наибольшее количество рисков сосредоточено на начальных этапах проекта из-за большой степени неопределенности, обусловленной ограниченной информацией о дальнейшем ходе проекта [7]. Приближаясь к завершению проекта и расширяя информационную базу о нем, риски, связанные с управлением проектом, обычно снижаются. Таким образом, наличие актуальной и доступной информация о состоянии проекта позволяет более эффективно управлять им.

Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью комплексного понимания современных вызовов и возможностей, которые представляют

собой технологии информационного моделирования в контексте цифровизации строительной отрасли. Разработка эффективных методов и инструментов, позволяющих применять данные технологии в повседневной практике строительства, становится важной научной и практической задачей, нацеленной на повышение качества и эффективности управления строительными проектами.

Таким образом, данная статья направлена на обобщение современных подходов к использованию технологий информационного моделирования в сфере строительства, обоснование их актуальности и практической значимости для различных участников строительного процесса. Исследование позволило определить наиболее актуальные проблемы применения ТИМ в России и сформулировать варианты

решений этих проблем, которые могут позволить избежать ошибочных гипотез при внедрении ТИМ в России.

В настоящее время проблемам цифровизации отрасли строительства посвящены многочисленные научные исследования (Уткина В.Н., Грязнов С.Ю., Бабушкина Д.Р. [8] и др [9,10].

Методология. Учитывая описанные выше аспекты, цель настоящей работы заключается в проведении комплексного исследования методов применения информационного моделирования, особенно *BIM*, как инструмента для цифровизации строительной отрасли. Исследование включает анализ влияния технологий *BIM* на управление строительством, оптимизацию процессов и улучшение взаимодействия между участниками проектов.

Для достижения этой цели были применены следующие методы и методики:

1. Обзор литературы и анализ публикаций: проанализированы последние исследования и публикации, касающиеся внедрения и использования технологий информационного моделирования в строительстве. Выполнен анализ различных методов применения *BIM* и других технологий, а также общих тенденций, выявленных в отношении влияния *BIM* на строительную отрасль.

2. Кейс-стади и моделирование: рассмотрены несколько кейсов применения *BIM* на различных строительных объектах. Это позволило исследовать конкретные сценарии использования *BIM*, выделить успешные практики, а также выявить проблемные моменты, требующие внимания и улучшения.

Выводы полученные через методологию позволили сделать значимый вклад в понимание влияния информационного моделирования на различные аспекты строительной отрасли, описать успешные кейсы и предложить рекомендации для улучшения процессов в будущем.

Результаты. Опытным путём и с помощью анализа исследований (Mousharbash, N [11], Smith P.[12], Savey L., Daradkeh I.I., Gouveia L.B.[13]) в рассматриваемой области были выделены основные процессы управления проектом, в которых применение *BIM* позволит повысить информативность таких процессов. Данные цифровой информационной модели могут применяться в процессах проектирования объекта, процессах экспертизы проектных решений на соответствие различным требованиям, при управлении стоимостью реализации проекта, в процессе строительного контроля по результатам выполнения строительно-монтажных работ, для формирования и передачи разрешительных и отчетных документов в различные ведомственные системы, при эксплуатации объекта и планировании развития территорий и города.

Важно сказать, что это часть наиболее очевидных процессов для внедрения в них технологий информационного моделирования, но область применения информационного моделирования в строительстве

потенциально намного шире.

В таблице 1 описаны текущие возможности и сопутствующие проблемы при применении ТИМ в контексте цифровизации процессов в строительной области.

Стоит выделить общие аспекты внедрения ТИМ, как инструмента цифровизации строительной отрасли, с учётом комментариев автора:

1) Уровень отечественного нормативного и методического обеспечения ТИМ в строительной отрасли на данный момент находится на низком уровне [32, 33]. На данный момент нормативная база, регламентирующая применение ТИМ, только в процессе формирования. На момент 2024 года утвержден ряд нормативных документов, в том числе ГОСТ Р 10.00.00.00-2023 «Единая система информационного моделирования. Основные положения» и ПНСТ 909-2024 «Требование к цифровым информационным моделям объектов производственного назначения. Часть 1. Жилые здания», что является важным шагом для развития системы нормативной базы для повышения уровня цифровизации строительной отрасли.

Кроме этого, важным является использовать принципы цифровизации и при формировании самой нормативной базы. В 2024 году утвержден документ ПНСТ 864-2023 «Умные (*SMART*) стандарты. Общие положения» с датой введения в действие 01.02.2024. Применение подходов *SMART*-стандартизации позволит эффективнее внедрять и соблюдать разработанные на её основе документы в различных отраслях.

2) Единое развитие программного и технического обеспечения в области ТИМ, позволит использовать единые подходы в работе и снизить потери информации при обмене данными в программных продуктах разных вендоров. Внедрение общего языка цифровизации строительной отрасли [34, 35] позволит вывести единые методики работы, автоматизировать различные процессы и конкретнее определить вектор дальнейшего развития технологий в области строительства. Важным также является готовность разработчиков специализированных программных продуктов для ТИМ идти навстречу пользователям в части доработки функционала систем [36].

3) Государственная поддержка при внедрении новых технологий позволяет снижать затраты на развитие инфраструктуры предприятий для обеспечения применения ТИМ в работе и переобучения специалистов.

4) Подготовка квалифицированных кадров путём обучения и переобучения актуальным запросам рынка в области ТИМ является важной задачей для развития отрасли [37]. Неготовность кадров к применению новых программных инструментов, отсутствие знаний о принципах формирования и обмена информации в соответствии с отраслевыми стандартами является одним из главных препятствий при внедрении новых технологий в процесс работы.

Таблица 1 – Возможности и текущие проблемы ТИМ

№	Возможности ТИМ	Описание	Текущие проблемы и варианты их решения
1	Автоматизация процессов проектирования	Эффективность применения BIM в процессе проектирования доказана на практике тем, что данная технология позволяет организовать совместную работу смежных специалистов в общем пространстве модели, получать актуальную информацию об изменениях у смежных специалистов, проводить автоматические проверки модели и использовать гибкие инструменты автоматизации различных процессов[14]. Среда общих данных может позволить проводить согласование проекта на основе ЦИМ с передачей замечаний сразу в системы автоматизированного проектирования (САПР) для их отработки исполнителями.	Развитые системы автоматизированного проектирования, используемые на практике в России, официально недоступны для работы из-за санкций. Проблема заключается в том, что все крупные компании организовывали свою работу в части BIM на основе ушедших зарубежных вендоров САПР. Переход на другие системы требует серьезных затрат. Другая проблема связана с тем, что отечественные аналогичные программные продукты отстают по функционалу от зарубежных. Также существует проблема высокой стоимости внедрения ТИМ. Решение: 1) Установление партнерских отношений с более доступными поставщиками программного обеспечения из дружественных стран. 2) Развитие системы государственной поддержки или финансирования для перехода на инновационные решения. На данный момент уже существуют программа финансирования пилотных тестирований инновационных решений на городских площадках Москвы. 3) Разработка гибких финансовых моделей или иных инструментов, позволяющих снизить затраты на внедрение технологий информационного моделирования. Развитие системы субсидий и льгот для проектов, где применяются ТИМ и иные инновационные решения. Отсутствие достаточной системы нормативно-технической документации и общепринятой методологии применения ТИМ на разных этапах ЖЦ объекта капитального строительства в России. Компании разрабатывают внутренние стандарты работы и организуют в соответствии с ними внутренние процессы. Решение: 1) Необходима разработка методологий и системы стандартов и сводов правил для применения ТИМ, охватывающих все этапы жизненного цикла объектов капитального строительства. В феврале 2024 года в области ТИМ принят ПНСТ 909-2024, который описывает единые требования к ЦИМ. Апробация методологических подходов может быть выполнена в Москве, как наиболее передовом регионе России, и передана региональным участникам строительной отрасли для внедрения и адаптации ТИМ под их запросы. Проблема квалификации кадров также является актуальной. Специалистов, которые могут работать с BIM, мало. Опытные специалисты редко готовы менять технологии работы. В ВУЗах программы обучения профильных специалистов начинают включать технологии информационного моделирования. Относительно низкая оплата труда в строительной сфере по сравнению со сферой информационных технологий, вынуждает специалистов с высоким уровнем навыков в технологиях информационного моделирования переходить из строительной сферы в более высокооплачиваемую сферу ИТ. Решение: 1) Проведение обучения и подготовки персонала для работы с новыми системами, с акцентом на эффективное использование доступных аналогов. 2) Развитие кадрового потенциала компаний для успешной интеграции и использования новых технологий. 3) Проведение семинаров, конкурсов, стажировок для обучающихся школьников и студентов позволит привлечь внимание к профессии и самостоятельно подготовить квалифицированные кадры.

Продолжение таблицы 1

№	Возможности ТИМ	Описание	Текущие проблемы и варианты их решения
2	Автоматизация экспертизы проектных решений	ЦИМ представляется в машиночитаемом и машинопонимаемом формате, это позволяет автоматизировать работу с ней в разных аспектах. На данный момент существуют как зарубежные, так и отечественные программные продукты, которые позволяют проверять ЦИМ на содержание требуемой информации, коллизии и различные требования, в том числе нормативные. Таким образом, можно проверять расположение элементов модели, их геометрические параметры, характеристики, расстояние между элементами и т.д. Кроме того, трёхмерная визуализация объекта упрощает проверку для эксперта. Указанные преимущества применения BIM значительно сокращают время экспертизы проектных решений и повышают качество и безопасность проекта [15].	На данный момент программные инструменты позволяют реализовывать относительно простые проверки в части требований. Т.е. требования со сложными условиями в ЦИМ проверить автоматически затруднительно. Решение: 1) Необходимо развитие функционала специализированных программ в области ТИМ с учётом специфики проверок на соответствие требованиям. Выявить указанную специфику помогут пилотные проекты, направленные на анализ нормативных требований с учётом концепции представления информации в ЦИМ. Отсутствует база машиночитаемых требований к объекту капитального строительства. Нормативно-техническая база в текущем её виде не поддается автоматической обработке и анализу, так как текст нормативных документов написан в человекоосприимчивой форме и представлен не в машиночитаемых и не машинопонимаемых форматах. Решение: 1) Необходим новый подход к формированию нормативной базы. Таким подходом может быть применения SMART-стандартов, где предусматривается наличие машиночитаемого и машинопонимаемого формата. Кроме этого, цифровизация нормативной базы позволит выявить коллизии в самих требованиях между разным нормативно-техническими документами [16,17]. 2) Необходимо развитие существующих стандартов проверки соответствия требованиям ЦИМ (например, IDS) или разработка самостоятельных отечественных стандартов и форматов формирования машинопонимаемых и машиночитаемых правил проверок ЦИМ.
3	Автоматизация процесса управления стоимостью	Электронно представление объекта в виде ЦИМ позволяет автоматизировать процесс расчёта технико-экономических показателей, формирование ведомостей объёмов работ и смет. Также в процессе изменений, вносимых в объект и отображаемых в ЦИМ, можно выполнить перерасчёт и оценить изменения.[18-22] При формировании графика работа используется 4D моделирование, учитывающее время строительства, что позволяет отслеживать ход работ, прогнозировать изменения сроков и принимать актуальные управленческие решения [23-25].	Отсутствие стандартов, нормативной базы и четко выработанных нормативных документов затрудняет применение BIM для целей управления стоимостью. Это усложняет процессы взаимодействия сметчиков и иных специалистов. Решение: 1) Необходима разработка методологий и подходов к применению ТИМ для задач формирования сметных документов проекта, основанных и апробированных в пилотных проектах. На данный момент существует отечественное программное обеспечение, которое позволяет формировать ведомости объемов работ и сметную документацию на основе ЦИМ, например LARIX (ООО "АЙБИМ"), ABC (ООО НПФ «ABC-Н»), BIMIT (ООО "БИМИТ" и др.). Однако, в России практика оценки и управления стоимостью на основе ЦИМ небольшая. Решение: 1) Финансирование, субсидирование и выделение грантов для пилотных проектов с применением ТИМ. Дефицит квалифицированных кадров в части BIM. Опытные инженеры-сметчики редко применяют в своей работе BIM, а у специалистов, которые имеют навык работы с BIM, может быть недостаточно опыта для составления качественной сметы. Таким образом, наблюдается недостаток специалистов с необходимыми навыками [26]. Решение предложено в п.1 данной Таблицы.

Продолжение таблицы 1

№	Возможности ТИМ	Описание	Текущие проблемы и варианты их решения
4	Автоматизация процесса стройконтроля	Применение BIM позволяет автоматизировать мониторинг строительных процессов на основе данных цифровых моделей, поддерживать более точный контроль за поведением проекта в реальном времени и в автоматическом режиме, формировать и передавать замечания в ЦИМ, а также обеспечивать точное сопоставление фактических результатов и планируемых задач, например при совместном применении BIM и технологии 3D-сканирования. В результате реализуется возможность оперативно выявлять и исправлять отклонения, минимизируя риски и повышая эффективность процесса строительства [27].	Высокая стоимость программных инструментов и устройств для их использования на строительной площадке затрудняет внедрение ТИМ в практику компаний. Решение: 1) Финансирование, субсидирование и выделение грантов для пилотных проектов с применением ТИМ. Дефицит квалифицированных кадров, обладающих навыками работы с ТИМ инструментами. Решение предложено в п.1 данной Таблицы. Нередко BIM модели охватывают только визуальные аспекты, но могут упускать другие важные параметры, такие как управление ресурсами и технологические решения, что снижает полезность BIM в стройконтроле. На данный момент существует отечественный продукт 7D Modeler, позволяющий прогнозировать и планировать управление ресурсами на этапе строительства. Решение: 1) Необходимо исследовать возможности интеграции дополнительных параметров, таких как управление ресурсами и технологические решения, в BIM модели. 2) Разработка пользовательских дополнений или плагинов для BIM программного обеспечения, чтобы расширить возможности моделирования. Отсутствие общепринятых методик и регламентов, обеспечивающих реализацию процессов стройконтроля с применением ТИМ. Решение предложено в п.1 данной Таблицы.
5	Автоматизация процесса передачи данных об объекте между системами различных ведомств (интеграция систем)	Систематизация и автоматизация процессов обмена информацией по объекту между разными ведомствами позволит сократить количество бюрократических процедур, связанных с предоставлением информации участникам проектов различным ведомствам.	Отсутствие достаточной интеграции и взаимосвязи между различными ведомствами приводит к тому, что, например, застройщик вынужден дублировать одну и ту же информацию при предоставлении её в разные ведомства. Решение: 1) Необходима единая информационная платформа, интегрирующая всех необходимых участников инвестиционно-строительного проекта, аналог «Единого портала государственных услуг Российской Федерации», но в строительной области. Такая платформа должна обеспечивать взаимодействие и обмен информацией в одной среде разным организациям, ведомствам и другим учреждениям. Поскольку BIM-модели содержат большое количество конфиденциальной информации, включая данные о проектах, материалах и технологиях, необходимы строгие меры безопасности для защиты этих данных от утечек или несанкционированного доступа. Решение: 1) Необходимо внедрение многоуровневых методов аутентификации и шифрования для защиты BIM-моделей и связанных данных. 2) Систематический анализ и устранение обнаруженных рисков безопасности для предотвращения возможных утечек информации. 3) Хранения BIM-моделей на защищенных облачных платформах с возможностью шифрования данных и контроля доступа. Нередко возникают проблемы с интеграцией BIM в уже используемые системы управления и контроля, особенно в сфере планирования развития инфраструктуры. Решение: 1) Определите проблемные моменты и решите их на ранних этапах внедрения, чтобы улучшить процесс интеграции в целом. Могут проводиться пилотные проекты для тестирования интеграции между BIM и системами управления. 2) Разработка общих стандартов и протоколов данных для обмена информацией между BIM и системами управления и контроля. 3) Определить совместимость форматов данных и определите четкие процедуры и правила для интеграции. 4) Разработка прикладных программных интерфейсов (API), позволяющих эффективно интегрировать BIM и системы управления.

Продолжение таблицы 1

№	Возможности ТИМ	Описание	Текущие проблемы и варианты их решения
6	Автоматизация процессов при эксплуатации объекта	ВІМ обеспечивает возможность подробного виртуального анализа и планирования обслуживания объектов. Благодаря детальной информации в ВІМ-моделях, управляющие компании могут более точно определить потребности в обслуживании и запасных частях, что в конечном итоге снижает затраты на обслуживание. ВІМ позволяет проводить анализ безопасности и устойчивости строительных объектов, что способствует раннему выявлению потенциальных рисков и улучшению безопасности эксплуатации. Благодаря возможности анализа энергопотребления и эффективности систем, ВІМ обеспечивает инструменты для создания более эффективных решений по управлению энергией и ресурсами на этапе эксплуатации.	Отсутствие единого стандарта, нормативной базы и четко выработанных нормативных документов затрудняет широкое применение ВІМ в строительной отрасли. Это усложняет согласование процессов эксплуатации с требованиями ВІМ. Решение предложено в п.1 данной Таблицы.
			Отсутствие запроса на применение ЦІМ со стороны эксплуатирующих организаций. Решение: 1) Различные методы финансовой поддержки могут стимулировать интерес к инновационным решениям, в том числе ТІМ.
			Нехватка квалифицированных специалистов: Внедрение ВІМ требует наличия высококвалифицированных специалистов, способных работать с ВІМ-моделями и адаптировать их для процессов эксплуатации. Недостаток подготовленных кадров может замедлить внедрение этой технологии. Решение предложено в п.1 данной Таблицы.
			Проблемы взаимодействия с существующими системами управления: Существующие системы управления объектами капитального строительства могут быть несовместимы с ВІМ. Это создает трудности в интеграции ВІМ для улучшения процессов эксплуатации. Решение в части проблем интеграции ВІМ и существующих систем предложено в п.5 данной Таблицы.
7	Автоматизация документооборота, архивации	ЦІМ может быть использована как база данных, на основе которой возможно формировать документы для различных задач, а также ЦІМ может содержать ссылки на необходимую информацию и документы. ЦІМ позволяет сохранять и архивировать информацию о проектах для будущих потребностей.	Отсутствие методик применения и использования ЦІМ на протяжении всего жизненного цикла. Нет достаточной информации и практики об передаче данных между разными этапами ЖЦ и о способе применения ЦІМ для различных задач на каждом этапе ЖЦ объекта. Решение предложено в п.1 данной Таблицы.
8	Автоматизация процессов планирования развития инфраструктуры и территорий	ВІМ может позволить планировать развитие инфраструктуры с учетом всех пространственных особенностей территории. ВІМ облегчает взаимодействие между различными участниками процесса планирования развития инфраструктуры, такими как градостроители, инженеры, архитекторы и заказчики, обеспечивая более эффективное общение и совместную работу. ВІМ позволяет проводить анализ обслуживания и управления инфраструктурой в долгосрочной перспективе, что способствует принятию более информированных решений на этапе планирования развития территорий [28,29].	В России отсутствует общепринятая методология применения ВІМ в планировании инфраструктуры и территорий, что затрудняет стандартизацию процессов и координацию между участниками проектов. Решение предложено в п.1 данной Таблицы.
			Проблемы с качеством данных, их полнотой и согласованностью, особенно при объединении информации от различных источников. Решение: 1) Формирование единых подходов к верификации и валидации ВІМ модели позволит выполнять эффективный контроль качества данных, представленных в модели.

Продолжение таблицы 1

№	Возможности ТИМ	Описание	Текущие проблемы и варианты их решения
8	Автоматизация процессов планирования развития инфраструктуры и территорий	Детальная проработка информации позволит повысить уровень управления городом и его устойчивость[30], а именно: - выполнять грамотное городское планирование с учетом контекста окружающей среды; - моделировать и выявлять потенциально опасные территории; - управлять в условиях чрезвычайных ситуаций (обеспечение готовности к стихийным бедствиям, предотвращение стихийных бедствий, ликвидация их последствий) [31]; - формировать комфортную городскую среду и безопасную экологию; - выполнять благоустройство территории и рациональное ее использование; - проводить оперативную инвентаризацию элементов инфраструктуры города (столбы, подеревная съемка, остановки общественного транспорта и т. д.); - более корректно устанавливать стоимость текущих и перспективных работ за счет точной оценки планируемых объемов; - эффективно управлять городом без выезда на территорию	Трудности в создании централизованных и объединенных BIM-моделей, особенно в масштабе городского планирования из-за сложности объединения данных различных типов инфраструктуры. Решение: 1) Разработка и применение единых стандартов данных для различных типов инфраструктуры, обеспечивающих совместимость и интероперабельность данных. 2) Согласование принципов работы между разными участниками процесса городского планирования для создания централизованных BIM-моделей. 3) Определение процессов обмена данными и согласования между командами, чтобы обеспечить единство и целостность моделей. 4) Создание централизованной информационной модели города, которая учитывает сложности объединения данных. Несовместимость форматов данных между различными программными решениями и системами, усложняющая обмен информацией между участниками процесса. Использование открытых стандартов данных: Решение: 1) Использованию форматов данных, основанных на открытых стандартах, таких как Industry Foundation Classes (IFC) или альтернативных, для представления информации в BIM-моделях. Это обеспечит совместимость между различными программными решениями BIM . 2) Интеграционные платформы могут помочь сгладить различия в форматах данных и обеспечить более эффективный обмен информацией. Проблемы с интеграцией BIM в уже существующие инженерные и геоинформационные системы, что затрудняет совместное использование данных и совместимость. Решение представлено выше в п.8. Недостаточность современной инфраструктуры и вычислительных ресурсов для эффективной работы с крупными BIM-моделями. Решение: 1) Переноса крупных BIM-моделей на облачные серверы с более мощными вычислительными ресурсами. 2) Использование средств и методов оптимизации, чтобы уменьшить нагрузку на вычислительные ресурсы при работе с моделями (удаления ненужных деталей или применения упрощенных версий моделей для уменьшения объема данных)

Данное исследование объединяет взгляды различных ученых и специалистов в области строительства на применение технологий информационного моделирования в строительной отрасли, подчеркнув важность оценки влияния BIM на эффективность и результативность строительных проектов.

Полученные результаты полностью соответствуют целям статьи, представляя описание текущего состояния и перспектив внедрения информационного моделирования в практику строительной отрасли России.

Методика исследования включала обширный обзор литературы, анализ реальных проектов, а также применение моделирования для анализа внедрения

BIM на практике.

Полученные результаты представлены в виде подробной таблицы с определенными возможностями и проблемами в области применения технологий информационного моделирования. Для каждой проблемы автор сформулировал варианты решений, которые могут служить основой для исследования решений определённой проблемы.

Обсуждение. Проведенное исследование позволило сравнить полученные результаты с данными других статей (Юшкин И.И., Аламиди Ш.Г.Х., Сташевская Н.А.[38], Петроченко М. В., Недвига П. Н. и др. [39]), посвященных аналогичной тематике. Сделан вывод, что эффективное внедрение информационного моделирования, в сочетании с привлечением

современных технологий, действительно оказывает существенное влияние на различные аспекты управления строительными проектами, предоставляя новые возможности в работе. Разбор и обобщение полученных результатов выявили значительный прогресс в управлении строительными проектами с использованием *BIM*, особенно в сокращении сроков и улучшении качества работ.

Были выделены ключевые аспекты, которые заслуживают дополнительного разъяснения и анализа. Прежде всего, сравнение результатов данного исследования с предшествующими исследованиями выявило несколько важных отличий и сходств. Современные методы информационного моделирования, особенно *BIM*, действительно оказывают влияние на управление строительными проектами, подтверждая тем самым важность правильного внедрения данных технологий для повышения качества работы в строительной отрасли.

Эффективное применение информационного моделирования, в сочетании с инновационными технологиями, создает новый уровень перспектив для управления строительными проектами. Это отражается в улучшении процессов и повышении результативности проектов.

Однако, было обнаружено, что на практике на текущий момент нет универсального подхода к внедрению *BIM*, и важно учитывать контекст каждого конкретного проекта для достижения оптимальных результатов.

Также было уделено внимание различиям и сходствам между проведенным исследованием и другими проектами, посвященными области информационного моделирования в строительстве. Анализ не только методов, но и результатов исследований, позволил выявить позитивные и негативные аспекты применения *BIM*, выделить успешные практики и определить области для улучшения в будущем.

Выводы. Полученные результаты не противоречат существующим данным и исследованиям, однако дополняют их представляя собой комплексный подход к анализу состояния процессов внедрения технологий информационного моделирования в строительные процессы.

Проведенное исследование имеет практическое значение, так как позволяет выявить текущие проблемы в рассматриваемой области и оценить дополнительные возможности развития. Рассмотрены актуальные вопросы применения ТИМ в строительстве и предложены варианты решения по каждой выявленной проблеме.

В ходе исследования были получены ряд существенных результатов, которые подтверждают важность использования информационного моделирования в строительной отрасли. Полученные выводы подчеркивают значимость правильного внедрения *BIM* для оптимизации процессов и повышения эффективности управления строи-

тельными проектами. Дальнейшие изыскания в данном направлении могут быть направлены на более детальное изучение проблем и решений в сфере *BIM* в отрасли строительства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Распоряжение Правительства РФ от 31 октября 2022 г. № 3268-р Об утверждении Стратегии развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства РФ на период до 2030 г. с прогнозом до 2035 г.
2. Шестаков К.И., Соколов И.М., Пирогов М.А., Соловьев С.Г. Опыт АО «НПО «РИВС» в *BIM* [ТИМ] проектирования // Горная промышленность. – 2021. – №5-2. – С.42-52.
3. Мирошкин Н.В. Технический анализ существующих решений в рамках создания IT-системы проектирования работ по благоустройству и строительству // Вестник науки. – 2024. – №1 (70) Том 3. – С.679-682.
4. Крохин Д.Н. Как применение новейших технологий в архитектуре упрощает создание строительных проектов // Инновации и инвестиции. – 2023. – №7. – С.343-347.
5. Ожигбесова К.Е., Мингареева Р.Р., Сондуева С. Р. Технологии информационного моделирования (ТИМ) в строительстве РФ: Особенности применения на различных стадиях жизненного цикла объекта // Гуманитарные, социально-экономические и общественные науки. – 2021. – №11-1. – С.157-159
6. Фонтокина В.А., Савенко А.А., Самарский Е.Д. Роль *BIM*-технологий в организациях и технологии строительства // Вестник еврейской науки. – 2022. – №1. – Том 14.
7. Da Silva T.F.L., Arroiteia A.V., Melhado S.B. et al.Exploring the influence of risks in BIM implementation: a review exploring BIM critical success factors and bim implementation phases // Journal of Modern Project Management. – 2021. – Vol. 8, № 3. – P. 125-135.
8. Уткина В.Н., Грязнов С.Ю., Бабушкина Д.Р. Проблемы и перспективы внедрения технологии информационного моделирования в области строительства в России: проблемы и перспективы внедрения // Основы ЭУП. – 2019. – №1 (19). – С.57-61
9. Гусарова, А.А. Технологии информационного моделирования в России // Актуальные вопросы современной науки и практики: Сборник научных статей по материалам X Международной научно-практической конференции. В 2 частях, Уфа, 20 января 2023 года. Том Часть 2. – Уфа: ООО "Научно-издательский центр "Вестник науки", 2023. – С. 271-276.
10. Савина А.Г., Малявкина Л.И., Савин Д.А. Теоретико-методологические основы построения цифровой инфраструктуры управления объектами капитального строительства на базе *BIM* // Russian Journal of Economics and Law. – 2023. – №1. – С.90-109
11. Mousharbash, N. BIM based development of bill of materials with case studies.// BIM A+ International Conference 30th September and 1st October, 2021. Pp. 38-39
12. Smith P. BIM Implementation – Global Strategies // Procedia Engineering. – 2014. – Vol. 85. – Pp. 482-492.
13. Savey L., Daradkeh I.I., Gouveia L.B. The Success of Startups Through Digital Transformation // International Journal of Open Information Technologies. – 2020. – № 5(8). – Pp. 53-56.
14. Дорофеев Е.П. *BIM*-системы как инновационные инструменты в проектировании и строительстве // Экономика строительства. – 2023. – №7. – С.55-57.
15. Lu, P. Gong, Y. Tang et al. BIM-integrated construction safety risk assessment at the design stage of building projects // Automation in construction. – 2021. – Vol. 124. – P. 103553.
16. Муромцев Д.И., Шилин И.А., Плюхин Д.А., Баймуратов И.Р., Хайдарова Р.Р., Деметьева Ю.Ю., Ожигин Д.А., Мальшева Т.А. Построение графов знаний нормативной документации на основе семантического моделирования и автоматического извлечения терминов // Научнотехнический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2021. – Т. 21. – № 2. – С. 256-266.
17. Глухов Н.И., Наседкин П.Н. Разработка элементов онтологии комплексной системы защиты информации предприятия // «Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами»: электрон. науч. журн. – 2021. – №1(9). – С. 35-42.

18. А.А. Трегубова, Е.В. Мишкина Управление стоимостью проекта строительства индивидуального жилого дома с применением BIM-технологий // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. – 2020. – Т. 1. – С. 306-311.

19. Курбатова, А.Д. Управление стоимостью строительства на основе BIM технологий // Modern Science. – 2021. – № 11-3. – С. 92-95.

20. Ю.Г. Кислякова, Е.Д. Докучаева, К.В. Угланов. Роль BIM - технологий в оценке стоимости строительства // Фотинские чтения. – 2018. – № 1(9). – С. 102-104.

21. Diogo Ferronato. BIM-based cost estimation at early stages based on historical data, Erasmus Mundus Joint Master Degree Programme -ERASMUS+, European Master in Building Information Modelling BIM A+, September 2020.

22. Hari Krishna Krishnakumar, BIM-based optimization of the data acquiring process for construction and operational cost calculation, Technical University of Munich, 14. December 2021.

23. Дмитриева Т.Л., Ященко В.П., Курышов И.А. BIM как средство сквозного проектирования, технологии возведения и эксплуатации // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2023. – №2 (45). – С.252-261.

24. Wan Abdul Basir, Wan Nor Fa'Aizah & Ujang, Uznir & Majid, Zulkepli. (2023). Adaptation 4D and 5D BIM for BIM/GIS data integration in construction project management. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.

25. Attia, E. 2020. Workflows for the Automation of 4D/5D simulation, Master Th. Ljubljana, UL FGG, Second cycle master study programme Building information modelling - BIM A+.

26. Гудзь С.В. Проблемы интеграции сметного ценообразования в технологии информационного моделирования // Столыпинский вестник. – 2023. – №4. – С.1714-1718.

27. Сиргалин Р.Р., Эльшейх А.М. Повышение качества строительного контроля на основе технологий BIM // Системные технологии. – 2022. – №4 (45). – С.49-53.

28. Алябьев А.А., Иванов А.Е., Кобзев А.А., Никитин В.Н. Фотограмметрия в развитии городских агломераций // Вестник СГУГиТ. – 2022. – №1. – С.30-41.

29. El Haite, Anouar & Botton, Conrad. An Integrated BIM-GIS Dashboard to Improve BIM Coordination. – 2023.

30. Saeed, Yousif. Bim Technology Strategies in Designing Sustainable Cities. The Journal of University of Duhok. 2023.

31. Шеина С.Г., Новоселова И.В., Деметеев Д.С. Применение технологий информационного моделирования при возникновении чрезвычайных ситуаций // ИВД. – 2023. – №1 (97).

32. B. Manzoor, I. Othman, S. S. S. Gardezi et al. BIM-Based Research Framework for Sustainable Building Projects: A Strategy for Mitigating BIM Implementation Barriers // Applied sciences (Switzerland). – 2021. – Vol. 11. – № 12. – P. 5397.

33. Shi, Haotian. Development and Challenges of BIM in the Construction Industry in China and Australia. Highlights in Science, Engineering and Technology. – 2023.

34. Шахрамьян М.А., Куприяновский В.П., Климов А.А. Открытый BIM и автоматизированный учет объемов строительства: от машиночитаемых стандартов до реализации // International Journal of Open Information Technologies. – 2022. – №10. – С.128-147.

35. Шилкина С.В., Иванова О.В. Выбор программного обеспечения при реализации проектов на основе технологий информационного моделирования // Строительство и архитектура. – 2023. – №. 2. – С. 13-13.

36. Savey L., Daradkeh I.I., Gouveia L.B. The Success of Startups Through Digital Transformation // International Journal of Open Information Technologies. – 2020. – № 5(8). – P.53-56

37. Ponzio, Angelica & Filho, Dirceu & Weijh, Leticia & Mesquita, Morgana & Diehl, Natália & Schulz, Victor. (2023). Capacitação BIM para docentes: Módulo I. ENCONTRO NACIONAL SOBRE O ENSINO DE BIM.

38. Юшкин И.И., Алаиди Ш.Г.Х., Стасьевская Н.А. Проблемы и преимущества внедрения BIM на предприятиях строительной отрасли // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2022. – Т. 18. – No 2. – С.172-181.

39. Петроченко М.В., Недвига П.Н., Кукина А.А., Шерстюк В.В. Классификация строительной информации в BIM с использованием алгоритмов искусственного интеллекта // Вестник МГСУ. – 2022. – №11. – С.1537-1550.

Статья поступила в редакцию 30.01.2024

Статья принята к публикации 15.03.2024

УДК 005. 53; 004.942

EDN: QZBKSV

**УПРАВЛЕНИЕ ПРОФИЛАКТИЧЕСКИМИ РАБОТАМИ ПО ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ ПОЖАРОВ
АВТОМОБИЛЕЙ НА АВТОТРАНСПОРТНОМ ПРЕДПРИЯТИИ**

©Автор(ы) 2024

SPIN:3913-7751

AuthorID: 586844

ORCID: 0000-0002-2407-5061

МОТОРЫГИН Юрий Дмитриевич, доктор технических наук, профессор,

профессор кафедры криминалистики и инженерно-технических экспертиз

Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России

(196105, г. Санкт-Петербург, Московский пр-кт, д. 149, e-mail: fire-risk@mail.ru)

SPIN: 2838-2550

AuthorID:634849

ORCID: 0000-0003-3524-0568

ЛИТОВЧЕНКО Ирина Олеговна, кандидат технических наук, доцент кафедры трудового права

Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России

(196105, г. Санкт-Петербург, Московский пр-кт, д. 149, e-mail: litovchenko.irina@bk.ru)

SPIN: 1117-1748

AuthorID:1122241

ORCID: 0000-0002-2934-2536

ТОПИЛКИН Павел Сергеевич, старший преподаватель кафедры криминалистики и

инженерно-технических экспертиз

Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России

(196105, г. Санкт-Петербург, Московский пр-кт, д. 149, e-mail: kyb.valery@yandex.ru)

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы управления техническим обслуживанием и проведения ремонтных работ на предприятиях автомобильного транспорта. В настоящее время пожары, возникающие от неисправностей в электросети, вышли на первое место. Особенно опасны пожары на небольших автотранспортных предприятиях с низкой рентабельностью. На таких предприятиях обеспечить надежную пожарную безопасность в условиях рыночной экономики часто бывает затруднительно. Автомобильный парк таких предприятий имеет автомобили разного года выпуска, что усложняет проведение ремонтных работ. Профилактика и ликвидация пожароопасных режимов в электросети автомобилей на каждом жизненном этапе функционирования автомобиля имеет свою специфику. Разработанные математические модели позволяют получить информацию о вероятности возникновения пожароопасного аварийного режима в электросети автомобиля в зависимости от срока его эксплуатации. Предлагается использовать полученную информацию для целенаправленного управления профилактикой и предотвращением пожароопасных режимов в электросети автомобиля. Актуальность такой информации возрастает для автомобильных парков, где различаются степень эксплуатации, марка производителя, год выпуска и использование электрических элементов в автомобиле. Для реализации методики управления профилактическими работами разработан программный комплекс. Этот математический комплекс позволяет создавать базу данных автомобилей и проводить оценку пожарной безопасности электросети автомобилей.

Ключевые слова: автотранспортные предприятия, транспорт, электрооборудование, аварийные режимы работы электросети, пожарная безопасность, автомобильный транспорт, математическое моделирование.

**MANAGEMENT OF PREVENTIVE MAINTENANCE TO PREVENT CAR FIRES
AT A MOTOR TRANSPORT COMPANY**

© The Author(s) 2024

MOTORYGIN Yuriy Dmitrievich, doctor of technical sciences, professor,

professor of the Department of Criminalistics and Engineering-Technical Expertise

St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia

(196105, St. Petersburg, Moskovsky Avenue, 149, e-mail: fire-risk@mail.ru)

LITOVCHENKO Irina Olegovna, candidate of technical sciences, lecturer of the Department of Labor Law

St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia

(196105, St. Petersburg, Moskovsky Avenue, 149, e-mail: litovchenko.irina@bk.ru)

TOPILKIN Pavel Sergeevich, senior lecturer at the Department of Criminology and Engineering Expertise

St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia

(196105, St. Petersburg, Moskovsky Avenue, 149, 149, e-mail: kyb.valery@yandex.ru)

Abstract. The focus of the article is on the management of maintenance and repair work in road transport enterprises. The most pressing concern at the moment is the occurrence of fires caused by power grid malfunctions. Small

motor transport enterprises with low profitability are particularly vulnerable to these fires. Ensuring reliable fire safety in such enterprises is often challenging in a market economy. The repair work is further complicated by the fact that the car fleet consists of vehicles from different production years. Each stage of the car's operation requires specific measures to prevent and address fire hazards in the electrical network. The prevention and management of fire hazardous modes in the electric network of a car can be effectively achieved by utilizing the developed mathematical models that provide valuable insights into the probability of such emergencies occurring based on the car's service life. This information can be utilized to implement targeted measures to prevent and mitigate fire hazardous modes in the car's electrical network. The importance of this information is particularly significant for car parks, where various factors such as operational intensity, brand, production year, and the utilization of electrical components may vary. The implementation of a procedure for managing preventive work has resulted in the creation of a software package. This complex mathematical tool enables the assessment of fire safety in the electric network of cars by creating a database of cars.

Keywords: motor transport enterprises, transport, electrical equipment, emergency modes of operation of the electric grid, fire safety, road transport, mathematical modeling

Для цитирования: Моторыгин Ю.Д. Управление профилактическими работами по предотвращению пожаров автомобилей на автотранспортном предприятии / Ю.Д. Моторыгин, И.О. Литовченко, П.С. Топилкин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 1(65). – С. 35-41. – EDN: QZBKSV.

Введение. В настоящее время в России существует большое количество небольших автотранспортных предприятий (АТП) [1]. К ним относятся предприятия, осуществляющие городские и междугородные перевозки, туристические организации и ведомственные автомобильные хозяйства. Это объясняется структурными преобразованиями, произошедшими в начале 1990 годов. В это время процессы приватизации и разгосударствления на автомобильном транспорте были наиболее активны и поддерживались многими руководителями предприятий, готовых самостоятельно работать на рынке автоперевозок. Поэтому существующие в настоящее время АТП используют автомобили

различного года выпуска, от старых (послуживших 10-15 лет) до самых современных. Особенно это характерно для ведомственных автомобильных хозяйств.

Статистические данные по Российской Федерации, показывают, что количество пожаров на транспорте стоит на втором месте после жилого сектора [2], при этом пожары от электрических причин стоят на втором месте после неосторожного обращения с огнем [3]. На автомобильном транспорте пожары от аварийных режимов работы электросети занимают первое место. При этом возгорание одного автомобиля часто приводит к крупному пожару, когда сгорает весь автопарк (рис. 1).



Рисунок 1 – Последствия пожара на автотранспортном предприятии

Целью работы является разработка программного комплекса для управления профилактическими работами по предотвращению пожаров автомобилей на автотранспортном предприятии. В основу программного комплекса положена методика управления профилактическими работами

автотранспортного предприятия для анализа пожароопасных режимов в электросети автомобилей.

Методология. При возникновении пожара в автотранспортном средстве обычно проводится исследование причин возникновения пожара. На самом деле, электрические источники зажигания

известны. Однако частота возникновения каждого из этих аварийных режимов зависит от технических параметров автомобиля. Эти сведения используются в дальнейшем для управления профилактическими работами.

В современном транспортном средстве используется большое количество электрических элементов и, соответственно, электрических контактов. Аварийные режимы в электрооборудовании автомобиля можно разделить на две группы. К первой группе относятся неисправности, связанные с контактами. Это, в первую очередь, короткие замыкания в контактах разного потенциала, электрические перегрузки, связанные с добавлением штатного оборудования в электрическую сеть автомобиля, и большие переходные сопротивления, возникающие при нарушении целостности контактных соединений. Ко второй группе неисправностей относятся аварийные режимы, связанные с нарушением правил эксплуатации автомобильных устройств и элементов [4, 5].

Учитывая, что пожары от электрических источников зажигания стоят на втором месте после неосторожного обращения с огнем, был разработан программный комплекс, позволяющий управлять безопасностью электросети автомобиля в течении всего его жизненного цикла.

В работе использовались методы исследования, основанные на системном анализе профилактики пожароопасных электротехнических процессов, происходящих в электрической сети, на объектах транспортной инфраструктуры на различных этапах их жизненного цикла.

Результаты. В процессе эксплуатации автотранспортное средство может находиться в рабочем или в аварийном режиме. На рисунке 2 показаны параметры, влияющие на жизненный цикл и состояние автотранспортного средства на каждом этапе эксплуатации. При проведении своевременных профилактических работ возникновение аварийных и ремонтных состояний автомобиля можно сократить [4, 6, 7].



Рисунок 2 – Параметры, влияющие на жизненный цикл и состояние автотранспортного средства на каждом этапе эксплуатации

Управление профилактикой и ликвидацией пожароопасных режимов в электросети автомобилей на каждом жизненном этапе функционирования автомобиля имеет свою специфику. На рисунке 3 показан алгоритм оценки пожарной безопасности электросети автомобиля. На первом этапе в программном комплексе используется специальный алгоритм по созданию базы данных по состоянию элементов электрической сети эксплуатируемых автомобилей.

Для оценки текущего состояния элементов электросети автомобиля используется метод импульсной рефлектометрии. Суть метода заключается

в следующем. Генератор импульсов посылает импульсы в электрическую сеть автомобиля, импульсы отражаются от аварийных участков, а приемник оценивает вид неисправности [3,5,6]. В данном исследовании использовался прибор РЕЙС-105М1. В приборе реализован локационный метод, основанный на применении импульсной рефлектометрии. Использование прибора РЕЙС-105М1 с определенными доработками позволяет определить вид неисправности: обрыв, короткое замыкание, БПС, пробой изоляции и т. п. Кроме того, прибор определяет расстояние до неисправности с достаточной точностью.

Если неисправности не обнаружены, показания фиксируются в базе данных и в дальнейшем будут использоваться как эталонные. При обнаружении заводских неисправностей или при исследовании эклектической сети автомобиля в профилактических целях и выявлении значительных отклонений от эталонных значений, автотранспортное средство направляется для проведения ремонтных работ. После ликвидации неисправностей исследование методом рефлектометрии повторяется. В базу данных вводятся показатели импульсной рефлектометрии, характерные для исправной электрической сети.

Далее автотранспортное средство оценивается по периоду эксплуатации автомобиля. Все автомобили разбиваются на три периода эксплуатации. В начале эксплуатации автотранспортного средства могут возникать неисправности, характерные для

начального периода. Часто возникающие проблемы связаны с недостатками конструкции, неудачно спланированной компоновкой, наличием ошибок, которые могут проявиться в период начального использования автомобиля. Другие проблемы включают скрытые производственные недостатки, неисправности, связанные с использованием некачественных материалов и электрических компонентов, а также потенциальные неисправности, вызванные транспортировкой автомобиля [7-9]. Эти проблемы могут привести к аварийным режимам работы электросети и в дальнейшем способствовать возгоранию. Начальная фаза эксплуатации автомобиля называется периодом обкатки. Этот период считают завершенным, когда интенсивность отказов элементов электросети автомобиля приближается к минимальной величине.

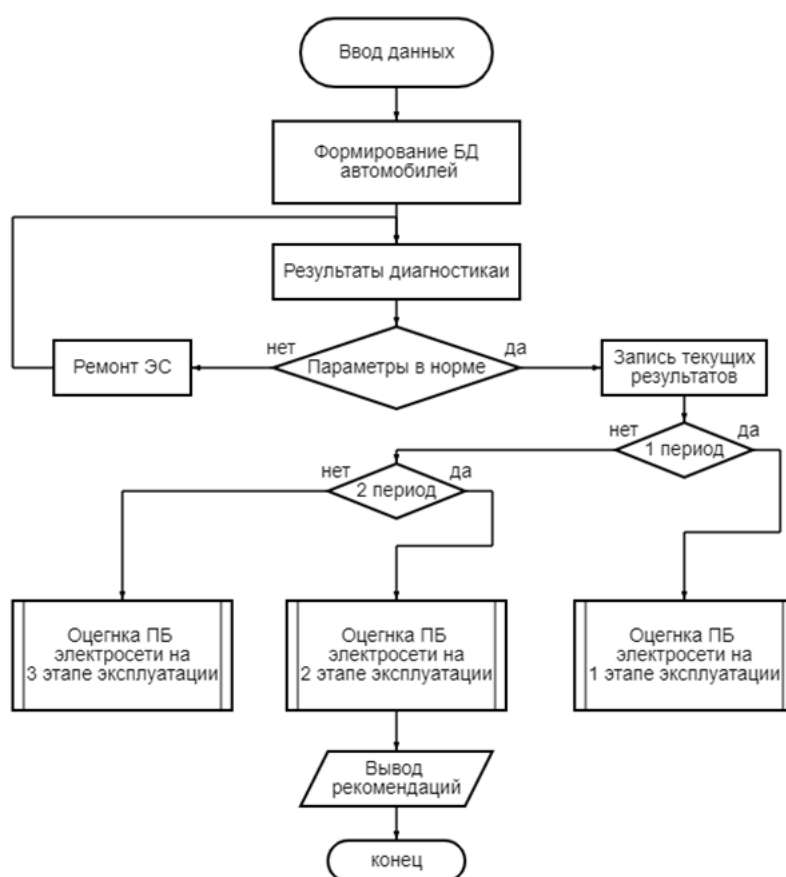


Рисунок 3 – Алгоритм оценки пожарной безопасности электросети автотранспортного средства

Следующий этап рассматривается как фаза нормальной эксплуатации, во время которой происходят отказы из-за различных случайных факторов [10-13]. Эти сбои практически невозможно предсказать или предотвратить, но важно отметить, что на данный момент в электрической сети автотранспортного средства остаются только полностью функциональные компоненты, так как они еще не достигли конца срока службы. Причем внезапные аварийные режимы действительно зависят от ряда

случайных факторов и часто определяются маркой (конструктивными особенностями) автомобиля. В целях анализа и технического обслуживания эти факторы определяются как частота отказов λ для определенного интервала времени. $(t1-t2)$. В этом интервале времени количество отказов остается минимальным и демонстрирует относительно постоянное значение $\lambda_{мин} \approx const$. Качество изготовления, точное соблюдение правил эксплуатации автомобиля, своевременное проведе-

ние профилактических работ позволяют увеличить временной интервал (t_1-t_2) и уменьшить частоту отказов λ .

На третьем этапе эксплуатации автомобиля происходит увеличение числа отказов. Это обусловлено износом и старением электрооборудования автомобиля [2, 14-16]. Причем третий этап характеризуется необратимыми физико-химическими изменениями, которые приводят к разрушению или частичному изменению свойств электрических элементов автомобиля. Эти процессы обычно необратимы и включают изменения диэлектрических показателей изоляции электрических проводов, непрерывное воздействие агрессивных сред, вызывающих значительные переходные процессы, механический износ деталей и многое другое.

Для оценки вероятной причине возникновения пожароопасного режима в автотранспортном средстве используется математическая модель, основанная на применении Марковских цепей [6, 11, 17].

Разработанный программный комплекс создает компьютерную базу данных автомобилей для небольших автомобильных предприятий. Причем использование прибора РЕЙС-105М1 с применением метода импульсной рефлектометрии уже на первых этапах оценивает пожарную безопасность электросети транспортного средства. Дальнейшие плановые проверки оценивают изменение (нарастание) аварийных режимов, проводя сравнения с ранее полученными данными.

Внешний вид программного комплекса показан на рисунке 4.



Рисунок 4 – Алгоритм оценки пожарной безопасности электросети автотранспортного средства

Распределение автомобилей, входящих в электронную базу данных, на три группы позволяет планировать частоту профилактических работ по устранению аварийно-пожарных режимов.

Риск возникновения пожара в электрической сети транспортного средства повышается при его работе в режимах перегрузки или короткого замыкания [14,15,18,20]. Когда возникают определенные аварийные режимы, такие как режим «плохой контакт», существует потенциальный риск возгорания из-за повышенных электрических контактных сопротивлений (БПС). Переходное электрическое сопротивление (R_n , Ом) увеличивается во время протекания электрического тока (I , А), при этом контактные соединения нагреваться выше допустимых значений. Потеря мощности из-за выделения тепла (P_n , Вт) в контакте определяется уравнением Джоуля-Ленца:

$$P_n = I^2 \cdot R_n.$$

В целях обеспечения пожарной и электрической безопасности нормативные требования к электрическим контактам в сети автомобиля регламентируют возможность допустимого нагрева при

номинальном электрическом токе или кратковременных токах короткого замыкания. Эти требования включены в проектирование, испытания, установку и эксплуатацию элементов электрической сети транспортного средства, а также учитываются при выборе защитных устройств. Однако действующие нормативные документы не учитывают режим «плохой контакт» (БПС).

Процесс старения может привести к увеличению сопротивления R_n , что приводит к образованию пленок с более высоким удельным сопротивлением на контактных поверхностях. Это вызывает утолщение оксидных пленок с течением времени, что приводит к увеличению выделения тепла и в дальнейшем карбонизации и воспламенению изоляции проводов. Для электроустановочных изделий максимально допустимым было принято падение напряжения от 7 до 15 мВ [7,18,20,21].

Обсуждение. Разработанный программный комплекс позволяет создавать базу данных автомобилей с учетом их технических и эксплуатационных параметров транспортного средства. При создании компьютерного комплекса был учтен и реализован

метод импульсной рефлектометрии. Это метод использовался для анализа высоковольтных промышленных сетей. Применение метода импульсной рефлектометрии для профилактики пожарной опасности в электрической сети автотранспортного средства впервые было предложено Косенко Д.В. [4]. В разработанном программном комплексе был реализован уникальный алгоритм исследования электросети автомобиля, позволяющий управлять проведением профилактических работ для повышения пожарной безопасности автомобиля.

Исследование электросети автомобиля показало, что самыми опасными аварийными режимами являются неисправности, связанные с большими переходными сопротивлениями. Если от коротких замыканий и перегрузки в электросети существуют защитные автоматические устройства или предохранители, то от БПС защиты не существует. Помочь могут только профилактические работы.

Переходное сопротивление контактного соединения сильно зависит от состояния контактной поверхности. Поддержание стабильности или минимизация повреждений контактного сопротивления во времени имеет решающее значение. Увеличение переходного сопротивления в электросети автомобиля может быть связано с такими факторами как окисление контактной поверхности от воздействия воздуха и коррозия контактного соединения из-за проникновения влаги. Поэтому важно вовремя защитить контактные поверхности от разрушения с помощью установленных способов обработки как самих соединений, так и электрической изоляции.

Выводы. Применение компьютерного комплекса позволит автоматизировать управление профилактическими работами автотранспортного предприятия для анализа пожароопасных режимов в электросети автомобиля.

Этот инновационный комплекс автоматически отслеживает порядок проведения профилактических работ на основе результатов, полученных при использовании импульсного метода рефлектометрии, с учетом математических моделей. Для оценки вероятной причины возникновения пожароопасного режима в автотранспортном средстве используются математические модели для трех этапов эксплуатации транспортного средства. Каждому этапу эксплуатации автомобиля соответствует своя математическая модель, основанная на использовании Марковских цепей [6, 11]. В результате, использование программного комплекса позволяет оптимально организовать планирование и реализацию профилактических мероприятий, что, в конечном итоге, повысит пожарную безопасность транспортных средств автотранспортных предприятий.

Регулярное техническое обслуживание электропроводки автомобиля имеет решающее значение для своевременного обнаружения и решения любых потенциальных проблем пожароопасных аварийных режимов работы.

1. Данный программный комплекс основан на современных алгоритмах и методах математического моделирования, что позволит точно оценивать состояние электросети и определять необходимость проведения профилактических работ.

2. Программный комплекс имеет гибкую настройку, позволяющую учитывать специфические особенности каждого участка электросети и предлагать оптимальные решения по проведению профилактических мероприятий.

3. Полученные результаты из математических моделей представлены в удобном и наглядном виде, что позволит оперативно принимать решения по проведению профилактических работ и мониторить их выполнение.

4. Кроме того, программный комплекс имеет возможность автоматического расчета затрат на проведение профилактических работ, что поможет оптимизировать бюджетные расходы и сократить издержки.

5. В результате, внедрение данного программного комплекса позволит значительно снизить вероятности возникновения аварийных ситуаций в электросети автомобиля, а также повысить надежность и долговечность ее работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Туревский И.С. Экономика отрасли (автомобильный транспорт): учебник. – М.: ИД «ФОРУМ»: ИНФРА-М, 2011. – 288 с.
2. Информационная оценка оптимального управления профилактикой и предотвращением пожароопасных режимов в электросети автомобиля. Моторыгин Ю.Д., Топилкин П.С. // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2022. – № 2 (62). – С. 61-68.
3. Пожары и пожарная безопасность в 2021 году. Статистический сборник. / Под общ.ред. Н.П.Копылова. – М.: ВНИИПО, 2022. – 135 с.
4. Методика анализа аварийных режимов работы контактных соединений электросети автотранспортных средств Косенко Д.В. автореферат дис. ... кандидата технических наук / С.-Петерб. гос. ун-т ГПС МЧС России. Санкт-Петербург; 2016
5. Светлов М.В. Техническое обслуживание и ремонт автомобильного транспорта. Дипломное проектирование: учебно-методическое пособие / М.В. Светлов. – 2-е изд., стер. – М.: КНОРУС, 2012. – 320 с.
6. Моделирование процессов развития горения пожарной нагрузки с помощью конечных цепей Маркова / Подрезова А.И., Ловчиков В.А., Моторыгин Ю.Д., Пешков И.А. Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – Т. 7. – № 3. – С. 176-179.
7. Смелков Г.И. Пожарная опасность электроустановок при аварийных режимах. — М.: Энергоатомиздат, 1984. – 184 с.
8. Н.К. Мышкин, В.В. Кончин, М. Браунович Электрические контакты // Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2008 – 560 с.
9. Таев И.С. Электрические контакты и дугогасительные устройства аппаратов низкого напряжения. – М.: Энергия, 1973. – 424 с.
10. Методика расчета пожарных рисков на транспорте. Архипов М.И., Косенко Д.В., Галишев М.А., Моторыгин Ю.Д. // Научно-аналитический журнал "Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России". – 2014. – № 3. – С. 132-139.
11. Система управления спасательными формированиями при угрозе возникновения чрезвычайных ситуаций гидрологического характера. Калач А.В., Зыбин Д.Г., Арифуллин Е.З., Моторыгин Ю.Д., Актерский Ю.Е. // Санкт-

Петербург; Воронеж, 2018.

12. Aoki Y. Studies on Probabilistic Spread of Fire, Research Paper No. 80, Building Research Institute, Tokyo, Japan 1978.

13. Transportation management of facilities for rescue operations upon disaster mitigation. Vilkov V.B., Chernykh A.K., Nefed'Yev S.A., Motorygin Y.D., Gromov V.N., Komashinskiy V.I. // International Journal of Civil Engineering and Technology. – 2018. – Т. 9. – № 1. – С. 676-687.

14. Литовченко И.О., Моторьгин Ю.Д., Гречуха Н.М. Процессы управления и принятия решения стохастическими методами в условиях чрезвычайных ситуаций. // Научно-аналитический журнал Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2016. – № 4. – С. 144-150.

15. Пожарная безопасность на открытых автостоянках. Моторьгин Ю.Д., Литовченко И.О., Дементьев Ф.А., Бельшина Ю.Н., Топилкин П.С. // Санкт-Петербург, 2022.

16. Токарь Е.В., Рогов Д.А., Чуев М.И. Ресурсный потенциал предприятия как условие его эффективного функционирования // Токарь Е.В., Рогов Д.А., Чуев М.И. Вестник Белгородского университета кооперации, экономики и права. – 2023. – № 2 (99). – С. 33-44.

17. Оценка пожарной безопасности электрической сети автомобиля. Топилкин П.С., Моторьгин Ю.Д. // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024610270, 09.01.2024. Заявка от 19.12.2023.

18. Моторьгин Ю.Д., Топилкин П.С., Литовченко И.О. Анализ возникновения и профилактика пожароопасных режимов в электросети автомобиля. // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2023. – № 3 (67). – С. 149-157.

19. Акимов С.В., Чижков Ю.П. Электрооборудование автомобилей. // Учебник для ВУЗов. – М.: ООО «Книжное издательство «За рулем», 2007. – 336 с.: ил.

20. Национальный стандарт РФ ГОСТ Р 50571.5.52-2011/ МЭК 60364-5-52:2009 "Электроустановки низковольтные. [Электронный ресурс]. – URL:// <https://elektroschyt.ru/> (дата обращения: 09.03.2023).

21. Приказ Минэнерго РФ от 12.08.2022 N 811 Об утверждении правил технической эксплуатации электроустановок потребителей электрической энергии. [Электронный ресурс]. – URL:// <https://normativ.kontur.ru/> (дата обращения: 09.03.2023).

Статья поступила в редакцию 28.12.2023

Статья принята к публикации 15.03.2024

УДК 004.383.3

EDN: UTZHSU

**ПРОГРАММНОЕ ЯДРО МИКРОПРОЦЕССОРА RISC АРХИТЕКТУРЫ НА БАЗЕ
ПРОГРАММИРУЕМОЙ ЛОГИЧЕСКОЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ СХЕМЫ**

© Авторы 2024

SPIN: 4241-0712

AuthorID: 348503

ORCID: 0009-0008-5775-4301

КОЛЬЧУГИНА Елена Анатольевна, доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры «Математическое обеспечение и применение ЭВМ»

Пензенский государственный университет

(440026, Россия, г. Пенза, улица Красная, 40, e-mail: kea@pnzgu.ru)

SPIN: 5470-1289

AuthorID: 650911

ORCID: 0000-0002-3358-4394

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

Пензенский государственный технологический университет

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

SPIN: 4628-3390

AuthorID: 215576

ORCID: 0000-0003-4756-0040

ПАЩЕНКО Дмитрий Владимирович, доктор технических наук, профессор, ректор

Пензенский государственный технологический университет

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

SPIN: 2177-7806

AuthorID: 644943

ORCID: 0000-0003-0989-3928

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

Пензенский государственный технологический университет

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

Аннотация. В данной статье рассматривается актуальная тема разработки и интеграции 8-разрядного RISC микропроцессора в программируемые логические интегральные схемы, совместимого с существующими микропроцессорами, например, семейства PIC. Основное внимание уделяется созданию микропроцессора, который не только соответствует требованиям современной микроэлектроники в плане энергопотребления и эффективности, но также предлагает удобные инструменты для компиляции и отладки. Авторы детально описывают методологию проектирования программного ядра микропроцессора на языке Verilog, основные принципы разработки микропроцессорных ядер для программируемых логических интегральных схем, а также подходы к синхронизации данных и интеграции периферийных устройств. Статья также включает в себя описание архитектуры микропроцессора, его ключевых компонентов и функциональной схемы. Представленные результаты демонстрируют преимущества интеграции микропроцессора в программируемую логическую интегральную схему, такие как возможность создания специализированных команд и систем на кристалле, гибкость в конфигурации периферии и упрощение процесса программирования. Обсуждение результатов подчеркивает перспективность использования разработанного микропроцессорного ядра в различных областях, таких как встраиваемые системы, цифровое управление питанием и вычислительные синтезаторы. В заключение статьи приведены основные выводы по работе.

Ключевые слова: архитектура, встраиваемое устройство, интерфейс, микроконтроллер, микропроцессорное ядро, производительность, синхронизация, эффективность, ПЛИС, Verilog.

**RISC ARCHITECTURE MICROPROCESSOR SOFTWARE CORE BASED ON A
FIELD-PROGRAMMABLE GATE ARRAY**

© The Authors 2024

KOLCHUGINA Elena Anatolievna, doctor of technical sciences, docent,
professor of the Department of Mathematical Support and Computer Application

Penza State University

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

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

Penza state technological University

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

PASHCHENKO Dmitry Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor, rector

Penza state technological University

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

TROKOZ Dmitry Anatolyevich, doctor of technical sciences, docent,

vice-rector for scientific work, professor of Programming Department

Penza State Technological University

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

Abstract. This paper deals with the current topic of development and integration of an 8-bit RISC microprocessor into programmable logic integrated circuits, compatible with existing microprocessors, such as the PIC family. The focus is on creating a microprocessor that not only meets the requirements of modern microelectronics in terms of power consumption and efficiency, but also offers user-friendly tools for compilation and debugging. The authors describe in detail the methodology for designing a microprocessor software core in the Verilog language, the basic principles of microprocessor kernel design for programmable logic integrated circuits, and approaches to data synchronization and peripheral integration. The paper also includes a description of the microprocessor architecture, its key components and functional circuitry. The results presented demonstrate the advantages of integrating a microprocessor into a programmable logic integrated circuit, such as the ability to create specialized on-chip instructions and systems, flexibility in peripheral configuration and simplification of the programming process. The discussion of the results highlights the promising applications of the developed microprocessor core in various fields such as embedded systems, digital power management and computational synthesizers. The paper is concluded with the main conclusions of the work

Keywords: architecture, embedded device, interface, microcontroller, microprocessor core, performance, synchronization, efficiency, FPGA, Verilog.

Для цитирования: Кольчугина Е.А. Программное ядро микропроцессора RISC архитектуры на базе программируемой логической интегральной схемы / Е.А. Кольчугина, А.И. Мартышкин, Д.В. Пащенко, Д.А. Трокоз // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 1(65). – С. 42-49. – EDN: UTZHSU.

Введение. В наше время мы все в большей степени оказываемся зависимы от передовых технологий в области «искусственного интеллекта». Часто это просто умные алгоритмы, основанные на нейронных сетях. Однако такие инновации все более интенсивно проникают в различные сферы жизни, открывая новые возможности. Одно из самых динамично развивающихся направлений в современной микроэлектронике и интеллектуальных системах – интеграция подобных алгоритмов в компактные системы с низким энергопотреблением.

Целью настоящей статьи является разработка 8-разрядного RISC микропроцессора (МП) с совместимым набор команд существующего МП, обладающего доступным для использования инструментарием компиляции и отладки. Ядро МП должно выполнять функции: каждая команда исполняется в одном цикле синхронизации; все команды хранятся в памяти команд при инициализации микросхемы; память данных находится в отдельном блоке памяти; необходимо задействовать стек для вызова подпрограмм. Также нужно разработать схемотехническое описание для программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) на языке Verilog.

Методология. Практическое проектирование на языке встраиваемых систем на ПЛИС с использованием языка Verilog хорошо описаны в книге «Язык Verilog в проектировании встраиваемых систем на FPGA» [1], которая является введением в практическое проектирование на языке Verilog встраиваемых систем на ПЛИС. Дано понятие

встраиваемой системы, рассмотрены область использования и функции встраиваемых систем. Рассмотрены вопросы проектирования на FPGA конечных автоматов, структурные модели, стили описания на языке Verilog, способы кодирования внутренних состояний, методы синтеза. Для каждого функционального узла приведены рекомендации по наиболее эффективному использованию рассматриваемых методов проектирования.

Принципы разработки встроенных микропроцессорных ядер (МПЯ) для ПЛИС подробно раскрыты в серии статей под названием «Микропроцессор своими руками» Иосифа Коршенбойма [2].

При разработке устройств с периферией, интегрированной на ПЛИС, и обрабатывающих в режиме реального времени большие объемы данных, процесс синхронизации передачи данных является критически важным [3-5]. МП и микроконтроллеры (МК), встроенные в ПЛИС, в отличие от внешних МК с 8-битной архитектурой работают в режиме синхронизации с периферией ПЛИС и не требуют дополнительных аппаратных средств для согласования обмена данными. Поэтому для их синхронизации с периферией требуется программное вмешательство, что занимает дополнительное время и ресурсы ПЛИС [6-8]. Более производительные внешние МК предоставляют аппаратные механизмы синхронизации данных, но их стоимость и требования к пространству на плате могут быть значительными. В некоторых случаях использование таких МК может быть оптимальным для малых задач.

Интеграция МП в ПЛИС открывает еще одно

преимущество: возможность создания специализированных команд, предопределенных пользователем. Путем предварительного программирования МП пользователь может определить группы часто используемых команд и объединить их в специализированные команды. Это не только повышает производительность МП для определенных классов задач, но и упрощает процесс программирования. Команды специального назначения могут выполняться в один такт или в несколько тактов. Еще одним преимуществом интеграции МП в ПЛИС является создание системы на кристалле (SoC) [9, 10]. Теперь МП не просто отдельный элемент или устройство, он становится частью большей сущности, легко управляемой и интегрируемой в общую систему. Суть его существования заключается не в физическом корпусе или структуре платы, а в виде программного файла, который входит в состав другого файла. И при этом, несмотря на такую форму интеграции, МП способен выполнять свои функции сравнимо или даже более эффективно, чем внешние МП. Несомненным преимуществом является гибкость в конфигурации периферии, которая может быть интегрирована непосредственно с МП в ПЛИС. Это означает, что пользователь может подключать к МП любые периферийные устройства, включая простые интерфейсы связи типа *UART* и *SPI*, а также более сложные контроллеры *Ethernet* или сопроцессоры

DSP [11]. Пользователь получает возможность настраивать периферию именно так, как ему необходимо для своих проектов.

Сопоставление внедрения МП в ПЛИС с конечным автоматом позволяет оценить сложность выполнения различных задач. При увеличении количества состояний конечного автомата увеличивается задержка сигнала и возникает необходимость повторной верификации проекта [12-14]. МП обеспечивает надежную производительность и не требует повторной верификации при изменении числа состояний. Каждая команда, исполняемая МП, имеет фиксированное время выполнения и не подвержена влиянию конкретной программы, обеспечивая стабильную эффективность в различных задачах и при изменениях программного кода.

Исходя из первоначальных предпосылок для создания 8-разрядного *RISC* МП на языке описания аппаратуры примем набор команд, соответствующий тому, который применяется в МК семейства *PIC* [15, 16]. Уточним, что целью настоящей статьи является разработка именно нетребовательного к ресурсам МП, который будет подходить к широкому ряду различных серий микросхем ПЛИС, иметь хорошую переносимость и по минимуму использовать привязку к специализированным блокам в ПЛИС (например, *DSP* и т.д.). Рассмотрим архитектуру, приведенную на рисунке 1.

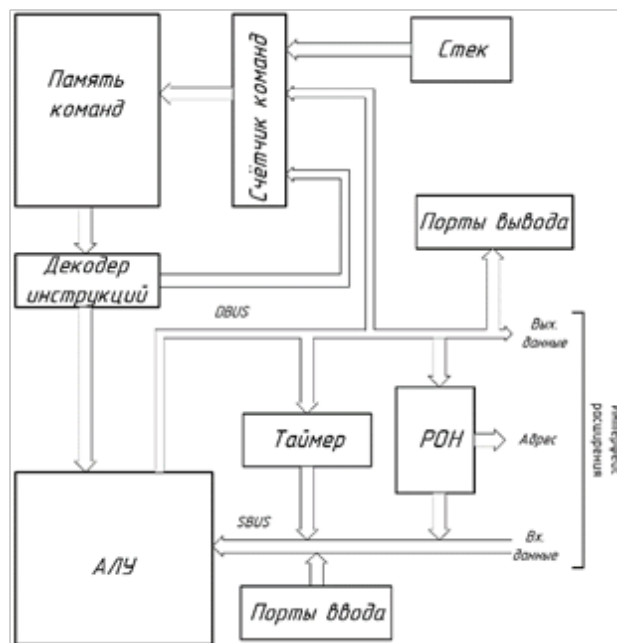


Рисунок 1 – Структура разрабатываемого микропроцессорного ядра

МП включает в себя несколько важных блоков, каждый из которых выполняет определенные функции:

1. Узел управления: генерирует сигналы управления для остальных блоков МП. Этот блок координирует работу всех компонентов, обеспечивая правильную последовательность выполнения операций.

2. Арифметико-логическое устройство (АЛУ): осуществляет выполнение арифметических и логических операций, а также логические операции и операции сравнения.

3. Счетчик адресов памяти команд: следит за адресами инструкций программы, указывая на текущую выполняемую команду.

4. Блок памяти команд: хранит инструкции программы, которые поступают на выполнение МП.

5. Блок памяти данных (РОН): используется для хранения данных, с которыми работает МП в процессе выполнения программы.

6. Декодер инструкций: определяет тип и формат каждой инструкции, позволяя МП правильно интерпретировать и выполнить ее.

7. Стек: используется для временного хранения данных и адресов в процессе выполнения программы, обеспечивая поддержку вызовов функций и

возвратов из них.

8. Таймер: обеспечивает отсчет временных интервалов или задержек, необходимых для реализации временных операций в программе.

9. Порты ввода-вывода: предоставляют интерфейс МП для взаимодействия с внешними устройствами и периферийными устройствами.

Перед тем как приступить к разработке и описанию функциональной схемы, необходимо выбрать оптимальную структуру. На рисунке 2 представлена предлагаемая функциональная схема.

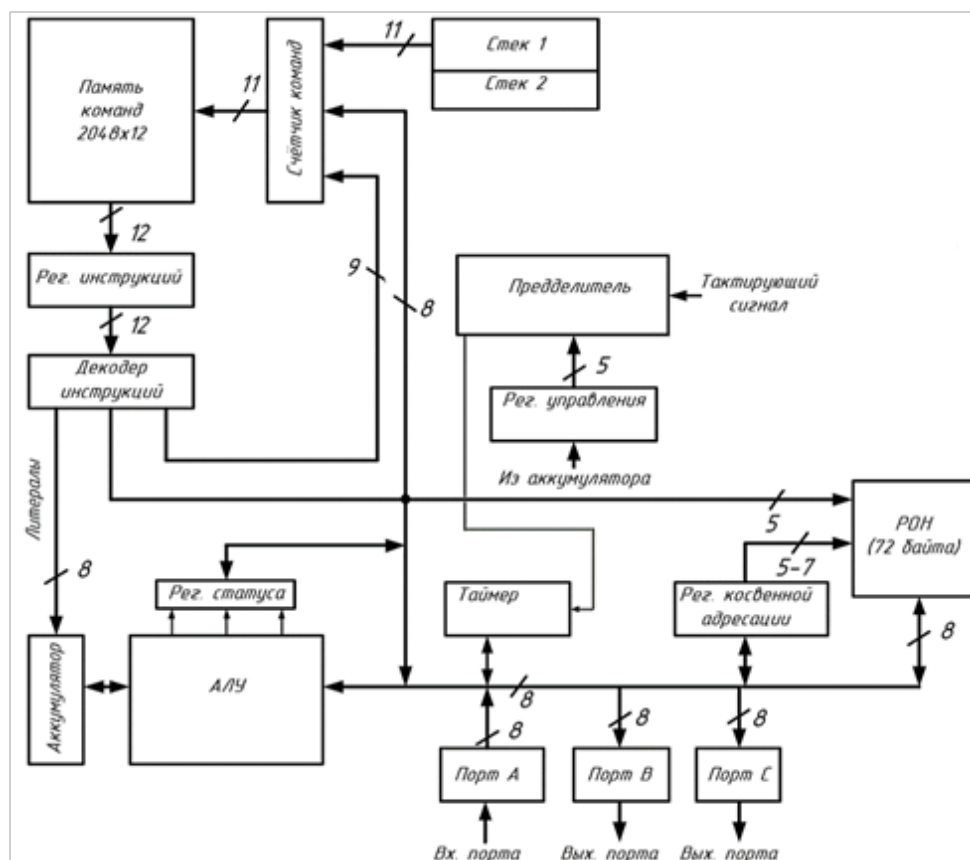


Рисунок 2 – Функциональный уровень микропроцессорного ядра

Функциональная схема включает в себя следующие компоненты:

- память команд, с областью адресации объемом 11 бит, что позволяет хранить 2048 команд;
- регистры общего назначения (РОН) с областью адресации, состоящей из 72 8-ми битных регистров;
- один 8-разрядный аккумулятор;
- область ввода-вывода, представленная набором 8-разрядных портов, обозначенных как А, В, С;
- входящий тактовый сигнал направляется на МП, где он используется для синхронизации работы блока предделителя таймера. Режим работы предделителя определяется регистром управления;
- при каждой загрузке микросхемы или инициализации системы по сигналу сброса счетчик команд обнуляется, начиная с чистого листа. Затем он активно отслеживает адреса программной памяти,

которые поступают с входа блока памяти команд. Каждый раз, когда он получает адрес, он моментально находит соответствующие данные в памяти команд и сохраняет их в регистре инструкций, готовые к последующей обработке. После этого из регистра инструкций команды передаются на дешифратор команд и в АЛУ. Коды команд МП используются для работы АЛУ;

– блоки РОН, стек, регистр статуса, аккумулятор, регистр управления, регистр косвенной адресации, таймер и порты ввода-вывода по внутренней шине данных обмениваются сигналами с АЛУ.

Результаты. Разрабатываемое МПЯ, принципиальная схема которого представлена на рисунке 3, спроектировано на основе гарвардской архитектуры и является совместимым с МК 16C57 фирмы Microchip. Разрядность инструкций составляет 12

бит, а разрядность шины данных – 8 бит. Память данных может содержать до 72 слов и до 2048 командных слова в памяти команд. У разрабатываемого МПЯ есть основанная на аккумуляторе система команд (33 инструкции). Регистр *W* – аккумулятор. Счетчик команд (*PC*) и два регистра стека, которые позволяют реализовывать 2 уровня подпрограмм (при необходимости возможно расширение). Ядро конвейерное обрабатывает выборку и выполнение инструкций. Регистровый файл использует банковскую схему и режим косвенной адресации. Регистровый файл ядра базируется на элементах триггеров, объединенных в регистры. Память программы (*PRAM*) является отдельной памятью от регистрового файла и расположена вне ядра. *PRAM* – в настоящий момент простая матрица элементов памяти *Verilog*, находящаяся в *test.v*. Ядро синхронно с тактовой частотой и имеет один синхронный сброс.

АЛУ включает минимальный необходимый набор 8-разрядных операций. Декодер инструкции – комбинаторная таблица поиска, которая предоставляет ключевые управляющие сигналы. Поддерживаются основное для 16C57 порты ввода-вывода, но в отличие от портов 16C57 они не

двунаправленные (при необходимости это может быть реализовано в ядре). Какие-либо механизмы прерывания не поддерживаются в семействе 16C5X и не предлагаются в разрабатываемом МПЯ. Инструкции выполняются в одном цикле за исключением команд ветвления, требующих 2 циклов. Аргумент, часто приводимый в пользу отсутствия прерываний, заключается в том, что быстрое выполнение за один цикл и проверка битов инструкции позволяют осуществлять очень быстрый опрос и, следовательно, уменьшают потребность в прерываниях. Схема отладки интегрирована непосредственно в ядро. Модуль *test.v* предоставляет некоторую минимальную отладочную информацию, такую как печать изменений в портах ввода-вывода, отображение обновлений в регистровом файле, и т.д. Расширение функционала МПЯ обеспечивается через шину расширения в интерфейсе модуля *cpu.v*. Шина обеспечивает базовый набор сигналов адрес, шину чтения и записи данных и набор сигналов управления. Если планируется задействовать несколько модулей расширения тогда для них должна быть разработана собственная схема мультиплексирования сигналов данных.

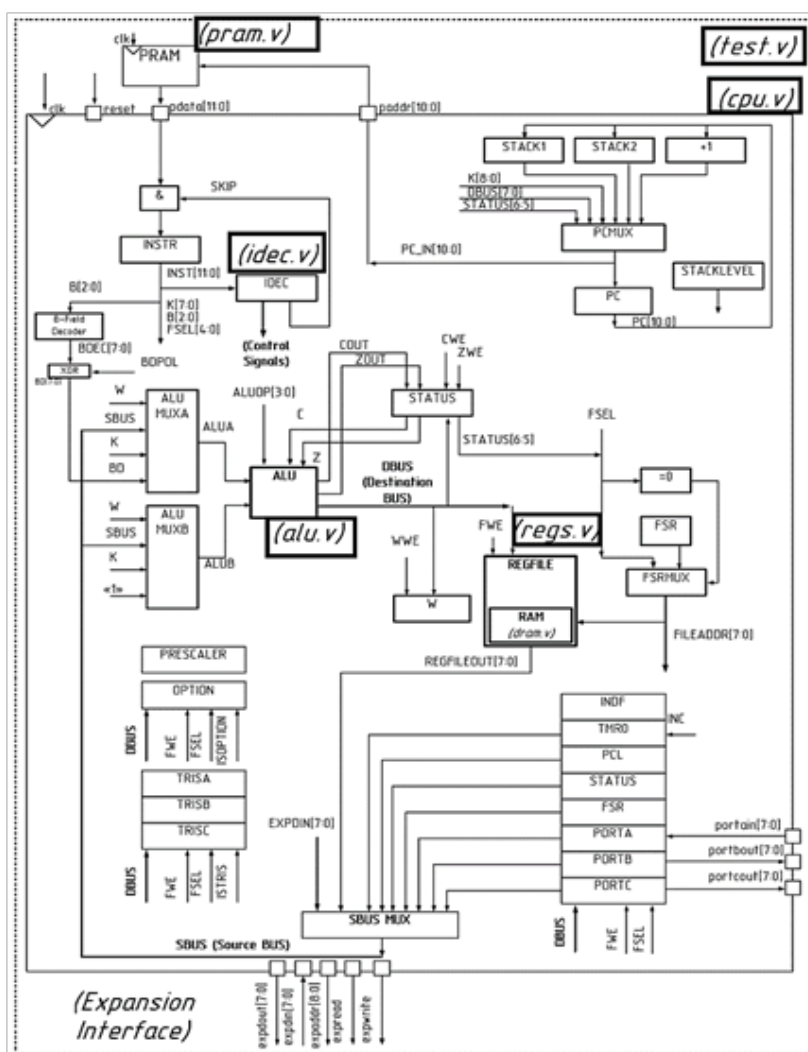


Рисунок 3 – Принципиальная схема микропроцессорного ядра

Разработка МПЯ. Описываемое в статье программное МПЯ является реализацией на языке *Verilog* [17-20] 8-разрядного МП совместимого с МК 16C57. Четыре основных модуля (*cpu*, *idec*, *alu* и *regs*) могут быть синтезированы напрямую. Особое внимание требуется уделить двум модулям памяти. Модули *pram.v* и *dram.v* можно рассматривать как «оболочки», внутри которых реализованы специфичные для технологии объявления оперативной памяти. Память регистрового файла представлена в модуле самого низкого уровня иерархии, файлом *dram.v*. Этот модуль представляет собой модель синхронной оперативной памяти. Модуль по умолчанию предназначен в качестве модели поведенческой памяти и включает директивы «*synopsys translate_off*». Однако модуль может быть синтезирован, если требуется регистровый файл на основе триггеров. Память регистрового файла должна реализовывать режим чтения/изменения/записи. Запись должна быть синхронной, но при этом чтение должно быть асинхронным. Такое поведение требуется из-за инструкций, которые должны считывать/изменять/записывать файловые регистры в рамках одной инструкции, например: *incf 12, f* (эта инструкция увеличивает регистр файла на 12).

Модуль центрального процессора. Модуль центрального процессора – синтезируемый модуль верхнего уровня. В нем реализованы следующие функции: все специальные регистры, такие как *INST*, *W*, *STACK1*, *STACK2* и *PC*; управление выполнением программы; внутренние шины и мультиплексоры; организация ввода-вывода; специальные схемы, такие как таймер или пользовательская схема.

У МП есть способы, которыми он изменяет процесс выполнения программы: инструкция безусловного перехода *GOTO*; инструкция вызова подпрограммы *CALL*; инструкции обхода по условию (*SKIP*).

Инструкция *GOTO* кодирует адрес назначения непосредственно в поле инструкции. Подпрограммы выполняются аппаратно с использованием регистров стека (в отличие от программного стека и регистров указателей стека). Отчасти это результат гарвардской архитектуры и строгого разделения пространства программ и данных. Инструкции пропуска являются условными и обычно включают в себя проверку битов в регистре. Всякий раз, когда осуществляется переход, конвейер выборки/выполнения должен быть «остановлен». Обычно следующая инструкция всегда извлекается во время выполнения текущей инструкции. Когда осуществляется переход, то предстоящая инструкция фактически недействительна. МПЯ исправляет эту ситуацию, вводя инструкцию *NOP* в регистр инструкции *INST*, следующей за переходом. Этот же трюк выполняется и в ядре. Для этих целей удобной оказывается инструкция *NOP*, код которой равен 0x0000. Принудительное выполнение инструкции *NOP* выполняется простым заполнением выход-

ных данных регистра *INST* нулями всякий раз, когда обнаруживается переход. Внутренний сигнал пропуска (*SKIP*) ядра подается каждый раз, когда обнаруживается переход и требуется принудительное выполнение инструкции *NOP*.

Модули интерфейсов памяти. Интерфейс памяти программ прост с точки зрения самого ядра. Вводится 11-битный адрес и по заданному адресу выводится 12-битные данные. Чтение является синхронным. Сама программная память (*PRAM*) описана в файле *pram.v*, который представляет собой очень простую синхронную модель оперативной памяти. Память *PRAM* находится вне ядра (внутри *test.v*, но вне *cpu.v*).

Интерфейс регистрового файла представляет собой синхронный интерфейс с входами тактирующей частоты и сброса. Входные данные адресации включают в себя 2-разрядный банк данных и 5-разрядный ввод относительной адресации. Сигналы разрешения чтения и записи являются входными: и для ввода и вывода имеются две отдельные 8-разрядные шины данных. Модуль *regs.v* реализует адресную логику, при которой некоторые слова зеркально отображаются в общий набор адресов. Ниже *regs.v* по иерархии приведена модель синхронной оперативной памяти в файле *dram.v*. Этот модуль аналогичен *pram.v* и представляет собой простую модель синхронной оперативной памяти.

Модуль АЛУ. Модуль АЛУ реализован в файле *alu.v* и является простым комбинаторным узлом. У модуля имеется два 8-разрядных входа данных, А и В и однобитный вход переноса. Выбор операции выполняемой АЛУ определяется 4-разрядным входным кодом. Так же модуль АЛУ имеет 8-битный выход данных, однобитный выход переноса и однобитный выход флага нулевого результата. АЛУ не выбирает соответствующий источник для своих входных данных и не решает, когда обновлять флаги состояния. Это делается на более высоком уровне декодером команд и процессорным модулем.

Модуль декодера инструкции. Декодирование команд реализовано в файле *dec.v*. Это полностью комбинаторная схема. Модуль реализован в виде большого оператора *case* языка *Verilog*; по одному или двум условиям на инструкцию. Выходные данные модуля представляют собой набор декодированных сигналов, используемых для различных целей управления. Инструкция начинает выполняться после того, как она загружена в регистре *INST*. Это происходит в каждом цикле, за исключением случаев, когда осуществляется переход. МП имеет 33 инструкции. Команда в регистре *INST* имеет ширину 12 бит. В инструкциях часто определяется несколько полей, включая поля *F*, *K* и *B*. Эти поля создаются в ядре из исходных 12 битов регистра *INST*. Каждая команда подразумевает определенный набор управляющих сигналов, выбор источника данных для АЛУ, обновление счетчика команд, разрешение записи в регистр состояния, адресация файлового регистра и т.д. Эти управляющие сигналы описаны

в одном месте модуля, в файле *idec.v*. Этот модуль выдает 15 управляющих сигналов.

Модуль регистрового файла. Регистровый файл реализуется в файле *regs.v* и является несколько более усложненным блоком, чем память программы, которая находится вне модуля ядра, и реализуется как простая память. Регистровый файл требует входного порта записи и выходного порта чтения. Также разделяется доступ на несколько «банков», которые иногда отображаются в один единый набор слов памяти. Это является также требуемым, чтобы «аннулировать» определенные расположения, которые используются для заказных периферийных ИС. Модуль *dreg.v* содержит всю логику, которая отображает адреса регистра (банки и смещения) на физические адреса ОЗУ. Регистровый файл содержит 70 8-разрядных слов данных. МК 16C57 имеет 72 регистра. Программное ядро имеет доступных 70 регистров, потому что, 2 регистра задействованы для размещения модуля расширения. Поскольку периферийные устройства добавляются, таким образом, дополнительные адреса для них должны быть взяты из пространства памяти. МК 16C57 используют 4-фазы тактирования, полученные с внешнего тактирующего устройства. Данное программное ядро использует единственный тактовый вход и разделяет его на 4-фазы. МК 16C57 используя различные фазы тактирующего сигнала, чтобы выполнять чтение и запись регистрового файла. Аналогично, программное ядро использует фазы, чтобы выполнить чтение и запись в пределах единственной инструкции «цикла». Регистровый файл должен быть доступен для чтения и записи во время одного командного цикла.

Использование модулей расширения. В данном случае под расширением подразумевается интеграция новых пользовательских модулей в систему. Это делается с помощью специального набора сигналов в интерфейсе модуля центрального процессора. Любое количество адресов в верхней части адресного пространства регистрового файла может быть зарезервировано для модулей расширения. Адреса, зарезервированные для схемы расширения, должны быть декодированы в модуле *cpu.v*. При необходимости конфигурация, касающаяся адресации модулей расширения, может быть изменена. Текущая конфигурация МП резервирует верхние 4 адреса для модулей расширения, которые нельзя использовать в качестве регистров хранения. Модули расширения должны использовать единый с МП тактирующий сигнал и выполнять единый с МП сброс. Доступ к модулям расширения выполняется за один цикл.

Обсуждение. Предложен вариант 8-разрядного RISC МП с совместимым набором команд существующего МП, обладающего доступным для использования инструментарием компиляции и отладки. Разрабатываемое МПЯ относится к гарвардской архитектуре и является совместимым с

МК 16C57 фирмы *Microchip*. Приведенное в статье описание программного ядра микропроцессора RISC архитектуры на базе ПЛИС говорит об его эффективности и перспективности практического использования.

Выводы. В статье описан разработанный 8-разрядный RISC МП с совместимым набором команд существующего МП, обладающего доступным для использования инструментарием компиляции и отладки. МПЯ выполняет следующие функции: каждая команда исполняется в одном цикле синхронизации; все команды хранятся в памяти команд при инициализации микросхемы; память данных находится в отдельном блоке памяти; задействован стек для вызова подпрограмм. Разработано схемотехническое описание для ПЛИС на языке *Verilog*. Потенциальные сферы применения данной разработки: высокопроизводительные встраиваемые устройства (в том числе, с малым энергопотреблением); цифровые системы управления питанием; цифровые вычислительные синтезаторы и т.д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Соловьев В. В. Язык *Verilog* в проектировании встраиваемых систем на FPGA. М.: Горячая линия-Телеком, 2023. – 440 с.
2. Каршенбойм И. Микропроцессор своими руками // Компоненты и технологии. – 2002. – № 6 (23). – С. 80-83.
3. Зотов В.Ю. Проектирование встраиваемых микропроцессорных систем на основе ПЛИС фирмы Xilinx. – 2-е изд. М.: Горячая линия-Телеком, 2022. – 520 с.
4. Наваби, З. Проектирование встраиваемых систем на ПЛИС / З. Наваби ; перевод с английского В. В. Соловьева. – Москва: ДМК Пресс, 2016. – 464 с.
5. Строгонов, А.В. Цифровая обработка сигналов в базе проектируемых логических интегральных схем: учебное пособие для вузов / А.В. Строгонов. – 4-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 312 с.
6. Акаев А.М., Еркинова М.Е., Асылжанова А.Б. Проектирование изделий на FPGA // Высокие технологии, наука и образование: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей V Всероссийской научно-практической конференции, 2020. – С. 71-75.
7. Ушенина, И.В. Проектирование цифровых устройств на ПЛИС. – 2-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2023. – 408 с.
8. Суворова Е.А., Шейнин Ю.Э. Проектирование цифровых систем на VHDL. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 576 с.
9. Малышев Н.М., Рыбкин С.В. Особенность разработки САПР для проектирования и верификации конфигурации ПЛИС // Наноиндустрия. – 2020. – № S96-1. – С. 270-276.
10. Кистрин А.В., Баренин В.В., Ципорков Н.И. Проектирование микропроцессорных систем на основе ПЛИС // Методы и средства обработки и хранения информации: Межвузовский сборник научных трудов. Под ред. Б.В. Кострова. Рязань, 2019. С. 206-212.
11. Мангушев А.В., Конченков В.И. Разработка блока передачи данных по интерфейсу Ethernet на языке *Verilog* // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2023. № 2 (43). С. 32-38.
12. Salauyou V., Zabrocki L. Coding Techniques in *Verilog* for Finite State Machine Designs in FPGA // Lecture Notes in Computer Science. – 2019. – Т. 11703. – LNCS. – PP. 493-505.
13. Соловьев В.В. Проектирование функциональных блоков встраиваемых систем на FPGA. М.: Горячая линия-Телеком, 2021. – 252 с.
14. Библио П.Н., Ланкевич Ю.Ю., Романов В.И. Логическая минимизация при синтезе комбинационных структур в FPGA // Информатика. – 2021. – Т. 18. № 1. – С. 7-24.

15. Данилов М.А. Проектирование структуры информационной системы для тестирования микропроцессорных устройств // Устойчивое развитие науки и образования. – 2019. – № 2. – С. 233-236.
16. Эркенова М.У., Хатуаев Т.А., Мамчуев А.К., Камов М.У. Архитектура и иерархия микропроцессоров RISC и CISC // Евразийское пространство: экономика, право, общество. – 2023. – № 7. – С. 84-86.
17. Романов А.А., Лаппо А.Ю. Проектирование микропроцессорных устройств с использованием ПЛИС // Актуальные вопросы радиотехники и электроники: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. Под общей редакцией Е.А. Макарецкого. Тула, 2021. – С. 211-213.
18. Басс А.В., Антонов М.А. Работа с ПЛИС с использованием языка описания аппаратуры *Verilog* // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 3. – С. 19-24.
19. Барабанов В.Ф., Сафронов В.В., Зольников К.В., Оксюта О.В., Ачкасов А.В. Использование языков VHDL и *Verilog* для проектирования микроэлектронных устройств – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2021. – 82 с.
20. Игошина М.С. Сравнительный анализ высокоуровневых языков описания аппаратуры VHDL и *Verilog* // Новые информационные технологии в научных исследованиях (НИТ-2021): материалы XXVI Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Рязань, 2021. – С. 129-131.

Статья поступила в редакцию 20.02.2024

Статья принята к публикации 15.03.2024

УДК 004.89

EDN: RKBVRR

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

© Авторы 2024

SPIN: 2836-4223

AuthorID: 1194162

ORCID: 0000-0002-2814-3201

ШУРШЕВ Тимофей Валерьевич, магистрант Института прикладных компьютерных наук

Национальный исследовательский университет ИТМО

(197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д. 49, лит. А, t.shurshev2002@gmail.com)

SPIN: 8303-8942,

AuthorID: 467356

ORCID: 0009-0004-5861-2576

ХОМЕНКО Татьяна Владимировна, доктор технических наук, доцент,

заведующая кафедрой «Автоматизированные системы обработки информации и управления»

Астраханский государственный технический университет,

(414056, г. Астрахань, ул. Татищева, д. 16, t_v_homenko@mail.ru)

Аннотация. Представлено описание разработанной системы интеллектуальной поддержки принятия решений на основе сверточной нейронной сети для диагностики пневмонии. Показано, что разработка системы интеллектуальной поддержки принятия решения для диагностики пневмонии на основе анализа медицинских данных пациентов позволит снизить риски ошибочной диагностики и улучшить эффективность лечения. Представлена информационная модель системы интеллектуальной поддержки принятия решения для диагностики пневмонии. Входная информация для системы являются медицинские снимки легких, полученные при помощи различных методов исследования. Язык программирования *Python*. Библиотека *Keras* выбрана в качестве основного фреймворка для разработки сверточной нейронной сети. Библиотека *TensorFlow* выбрана в качестве основной библиотеки низкого уровня для работы с нейронными сетями. Библиотека *NumPy* выбрана в качестве основной библиотеки для работы с многомерными массивами данных. Библиотека *Pandas* выбрана в качестве основной библиотеки для работы с данными, такими как метаданные пациентов и результаты диагностики. Среда разработки *Jupyter Notebook*. Создана модель нейронной сети, в качестве архитектуры выбрана сверточная нейронная сеть. Описан подбор параметров нейронной сети. Показано, что при реализации сверточной нейронной сети, стоящей в основе системы поддержки принятия решений для диагностики заболеваний пневмонией было получено 1 246 401 параметр, 1 245 313 из которых являются обучаемыми. Результаты тестирования показали точность предсказаний в 92%.

Ключевые слова: сверточная нейронная сеть, искусственный интеллект, принятие решения, *Python*, пневмония, диагностика.

DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT DECISION SUPPORT SYSTEM BASED ON A CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK

© The Authors 2024

SHURSHEV Timofey Valerievich, master's student of the institute of Applied Computer Sciences

ITMO University

(197101, St. Petersburg, Kronverksky Prospekt, 49, lit. A, t.shurshev2002@gmail.com)

KHOMENKO Tatyana Vladimirovna, doctor of technical sciences, associate professor,
head of the Department "Automated Information Processing and Management Systems"

Astrakhan State Technical University

(414056, Astrakhan, Tatishcheva str., 16, t_v_homenko@mail.ru)

Abstract. A description of the developed intelligent decision support system based on a convolutional neural network for the diagnosis of pneumonia is presented. It is shown that the development of an intelligent decision support system for the diagnosis of pneumonia based on the analysis of medical data of patients will reduce the risks of erroneous diagnosis and improve the effectiveness of treatment. The information model of the intellectual decision support system for the diagnosis of pneumonia is presented. The input information for the system is medical images of the lungs obtained using various research methods. The *Python* programming language. The *Keras* library has been selected as the main framework for the development of a convolutional neural network. *TensorFlow* library is selected as the main low-level library for working with neural networks. The *NumPy* library has been selected as the main library for working with multidimensional data arrays. The *Pandas* library has been selected as the main library for working with data such as patient metadata and diagnostic results. *Jupyter Notebook* development environment. A neural network model was created, a convolutional neural network was chosen as the architecture. The selection of neural network parameters is described. It is shown that when implementing the convolutional neural network underlying the decision support system

for the diagnosis of pneumonia diseases, 1,246,401 parameters were obtained, 1,245,313 of which are trainable. The test results showed 92% accuracy of predictions.

Keywords: convolutional neural network, artificial intelligence, decision-making, *Python*, pneumonia, diagnostics.

Для цитирования: Шуришев Т.В. Разработка системы интеллектуальной поддержки принятия решений на основе сверточной нейронной сети / Т.В. Шуришев, Т.В. Хоменко // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 1(65). – С. 50-57. – EDN: RKBRR.

Введение. В современном мире информационные технологии открывают перспективы для разработки интеллектуальных систем поддержки принятия решений в процессе диагностирования заболеваний. Эти системы находят свое применение в анализе обширных массивов клинических данных, предоставляя медицинским работникам ценную помощь в формировании точных и обдуманных диагнозов. Примером подобного инновационного подхода является система, предназначенная для диагностики пневмонии, которая интегрирует в себя принципы работы сверточных нейронных сетей и разнообразных математических методик.

Пневмония, как известно, занимает одно из лидирующих мест среди заболеваний респираторной системы по степени риска развития серьезных последствий и смертности. Эффективность и оперативность ее диагностики играют критическую роль в определении адекватной терапевтической стратегии и минимизации вероятности осложнений [1].

Диагностика пневмонии – болезни легких, вызываемой многообразием микроорганизмов включая бактерии, вирусы, грибки и другие агенты, выступает объектом данного исследования. Пневмония способна привести к гравитационным последствиям, особенно у лиц с недостаточностью иммунной защиты, и в некоторых случаях может стать причиной летального исхода.

Ключевым диагностическим признаком пневмонии служат специфические изменения в структуре легочной ткани, которые можно выявить с использованием различных методов исследования, включая рентгенографию, компьютерную томографию, бронхоскопию, лабораторные анализы и прочие. Тем не менее, задача точной диагностики пневмонии нередко сталкивается с трудностями, особенно при наличии у пациента других легочных заболеваний или сопутствующих патологий, таких как диабет, сердечно-сосудистые болезни или онкология.

В контексте широкого использования искусственного интеллекта в разнообразных аспектах жизнедеятельности человека [2-10] системы поддержки принятия решений занимают важное место [11-14]. Система интеллектуальной поддержки диагностики пневмонии функционально внедряется в медицинскую практику, обеспечивая специалистам надежный инструмент для определения наличия данного заболевания у пациентов.

Существующие методы диагностики пневмонии. Процесс выявления пневмонии представляет собой многоэтапную задачу, подразумевающую деталь-

ный анализ медицинских данных и проявлений, наблюдаемых у пациента. Клиническая картина пневмонии может охватывать ряд симптомов, таких как кашель, ощущение боли в области груди, повышение температуры тела, общая слабость и быстрая утомляемость. Однако подобная симптоматика не является уникальной и может пересекаться с проявлениями других респираторных заболеваний, например, бронхита или гриппа, что создает определенные сложности при установлении диагноза пневмонии [1, 15].

В арсенале медицинских инструментов для диагностики пневмонии присутствуют такие методики, как рентген грудной клетки, лабораторный анализ крови и мокроты, бактериологическое и вирусологическое тестирование, а также компьютерная томография легких. Несмотря на их применимость, данные методы могут оказаться не всегда достаточно эффективными, к тому же они связаны с высокими затратами и требуют значительного времени на проведение анализа результатов.

В целях повышения точности диагностики пневмонии могут быть использованы более специфичные подходы, включая анализ бактериальных культур и биопсию легкого. Такие методы, однако, часто оказываются инвазивными и предполагают необходимость в специальной подготовке пациента, что может быть неосуществимо в некоторых клинических случаях.

Разработка и внедрение интеллектуальной системы поддержки принятия решений для диагностики пневмонии, основанной на комплексном анализе медицинских данных пациентов, предоставляет возможность минимизировать риск диагностических ошибок и улучшить результаты лечения.

Таким образом, прогресс в сфере медицинской диагностики, обусловленный применением методов машинного обучения и нейронных сетей для создания систем интеллектуальной поддержки принятия решений по диагностике пневмонии, открывает новые перспективы для определения вероятности заболевания на основании клинического профиля пациента и способствует формированию рекомендаций по адекватному лечению.

Методология. В процессе создания системы, основанной на принципах работы сверточных нейронных сетей, были задействованы фундаментальные концепции из области теории нейронных сетей и анализа образов, а также из теории множеств. Дополнительно, в разработке применялись методологии экспертной оценки, стратегии принятия и

поддержки решений. Для реализации указанного математического аппарата использовались специализированные программные инструменты, обладающие необходимыми функциональными возможностями.

Описание информационной модели системы.

Информационная модель системы интеллектуальной поддержки принятия решения для диагностики пневмонии состоит из набора компонентов, которые взаимодействуют между собой для обеспечения эффективной работы системы.

Информационная модель данной системы строится на нескольких основных элементах:

1. Источники данных (система активно собирает информацию из различных баз данных, содержащих медицинские изображения с детальными метаданными о диагнозах пациентов);
2. Обработка данных (применяются специализированные алгоритмы для анализа этих изображений, выявления важных диагностических признаков, таких как форма и размер легких, а также наличие патологических изменений);
3. Классификация (в основу системы заложено использование разнообразных классификаторов, включая как традиционные методы машинного обучения, так и сверточные нейронные сети, для определения, заражен ли пациент пневмонией);
4. Базы данных (для хранения и управления полученными медицинскими изображениями задействованы специализированные базы данных);
5. Аналитический модуль (система оснащена мощным аналитическим движком, предназначенным для комплексной обработки и анализа собранных данных).

Центральным компонентом в этой многоуровневой системе является классификатор на основе сверточной нейронной сети, который был обучен на широком наборе медицинских снимков, включая изображения, демонстрирующие наличие пневмонии.

Данный классификатор способен с высокой

точностью различать нормальные и патологически измененные снимки легких.

Выбор классификатора был обусловлен его высокой эффективностью и надежностью, подтвержденной в ходе тестирования на независимых выборках данных. Важным аспектом стало также использование маркированной базы данных для обучения, что позволило не только добиться высокой диагностической точности, но и учесть в модели разнообразие клинических проявлений пневмонии.

Благодаря применению классификатора и продуманной структуре информационной системы, достигается точность и надежность в диагностике пневмонии, что в значительной мере снижает риск диагностических ошибок и способствует выбору оптимальной стратегии лечения.

Для эффективного функционирования системы поддержки в выявлении пневмонии важно обеспечить доступ к определенной информации. Среди которой выделяются нормативно-справочные данные, которые включают в себя установленные медицинские стандарты и протоколы. Эти стандарты уточняют критерии, по которым процедуры диагностики и лечения должны осуществляться, а также указывают, в какие моменты медицинский персонал может прибегнуть к использованию данной системы поддержки принятия решений для диагностики пневмонии.

Для работы системы требуется входная информация, состоящая из медицинских изображений легких пациента. Эти изображения могут быть получены различными методами, включая рентген, компьютерную томографию и магнитно-резонансную томографию.

Не менее важной является дополнительная информация, связанная с каждым снимком, например, установленный диагноз, который демонстрируется на примерах, представленных на рисунках 1, 2, 3 [16]. Эти данные критически важны для адаптации процесса диагностики к уникальным характеристикам каждого конкретного случая заболевания.

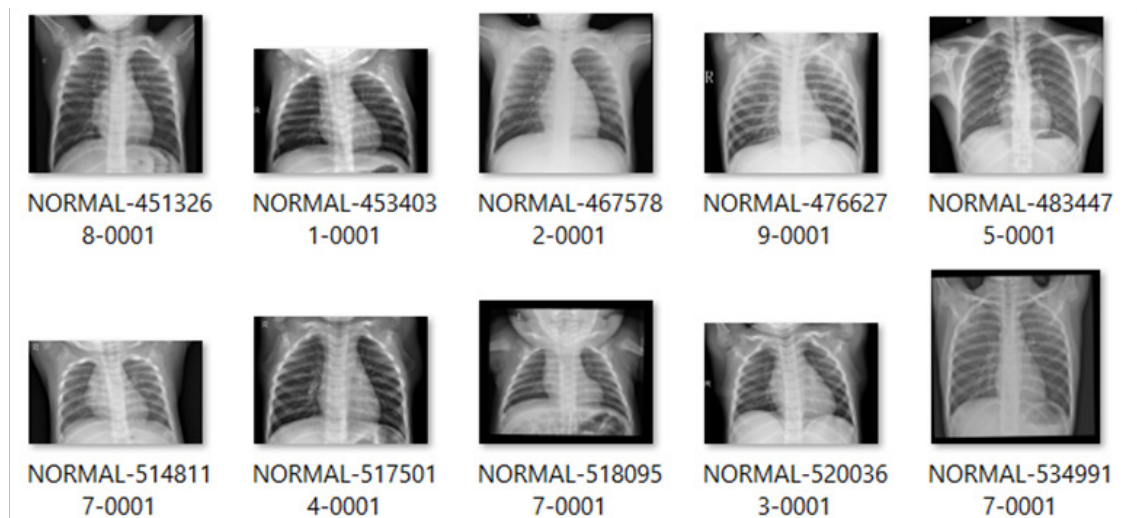


Рисунок 1 – Изображения (снимки) грудной клетки человека со здоровыми легкими

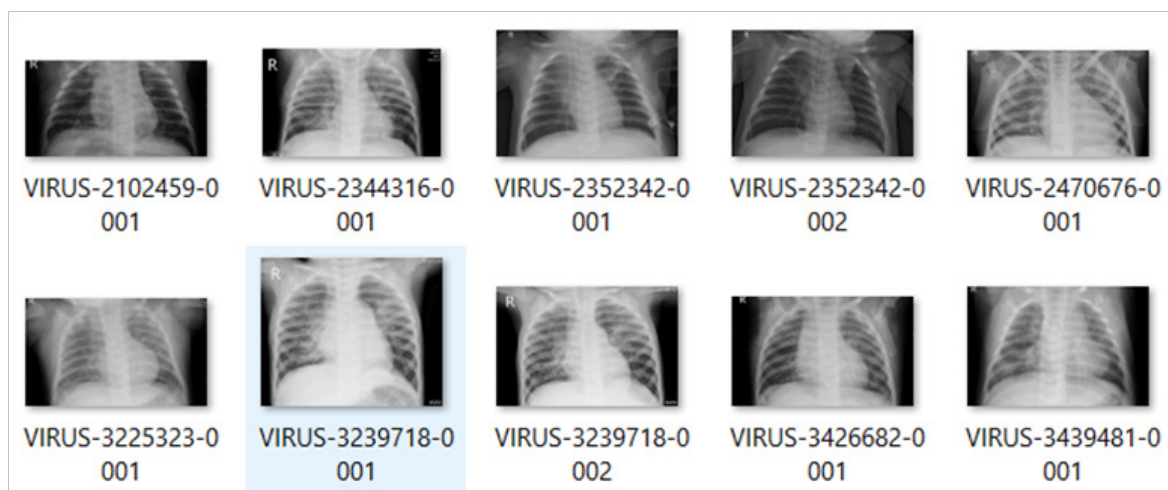


Рисунок 2 – Изображения (снимки) грудной клетки человека с вирусным заболеванием легких

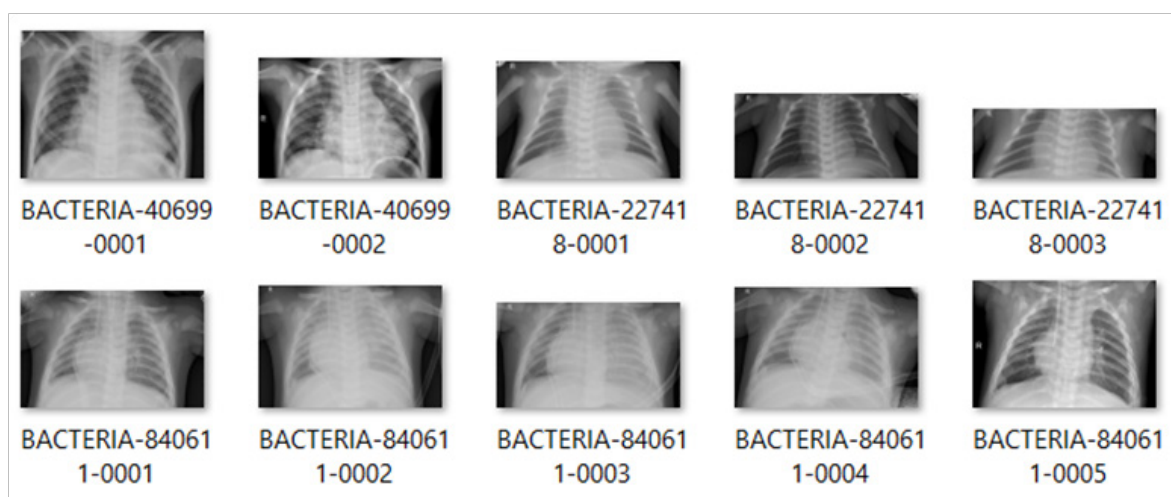


Рисунок 3 – Изображения (снимки) грудной клетки человека с бактериальным заболеванием легких

Для того, чтобы система поддержки принятия решений при диагностике пневмонии была эффективной для диагностики заболевания ей необходим доступ к актуальным обновляемым базам данных, в первую очередь, снимков грудной клетки человека и к медицинской литературе. Это необходимо для правильной интерпретации результатов исследования и постановки верного диагноза.

Ключевую роль в функционировании системы поддержки принятия решений для диагностики играют нормативно-справочная информация и данные, вводимые в систему. Что позволит гарантировать ее точность и надежность.

Выходными данными разработанной интеллектуальной системы поддержки принятия решений для диагностики пневмонии являются: результаты классификации пневмонии на основе обработанных снимков, а также визуализация снимков, позволяющая врачам более детально рассмотреть области легких, на которых была обнаружена пневмония и рекомендации по дальнейшему лечению на основе результатов диагностики.

Для каждого снимка система предоставляет результаты его обработки, включая вероятность

наличия пневмонии, а также описание областей, на которых были выявлены изменения. Для этого используются методы анализа изображений – сверточные нейронные сети и алгоритмы глубокого обучения.

Интерфейс системы разработан так, чтобы предоставлять врачам удобный доступ к изображениям, информацию о вероятности пневмонии и рекомендациям по лечению, тем самым делая процесс диагностики максимально информативным и понятным.

Средства разработки. Система поддержки принятия решений создана на языке программирования *Python*, который занимает ведущие позиции среди языков программирования, используемых в машинном обучении и искусственном интеллекте, благодаря многочисленным библиотекам и инструментам, которые облегчают разработку и тестирование моделей [17-19].

В качестве основного фреймворка для разработки сверточных нейронных сетей для диагностики пневмонии выбрана библиотека *Keras* за способность предоставлять удобный высокоуровневый интерфейс к таким мощным библиотекам, как *TensorFlow*

и *Theano*. Это значительно упрощает разработку и тренировку сложных архитектур нейронных сетей.

Для манипуляции с многомерными массивами данных, включая изображения для обучения и тестирования моделей, использована библиотека *Numpy*, обеспечивающая необходимые вычислительные операции.

Библиотека *Pandas* выбрана как инструментальная библиотека для обработки и анализа данных, включая метаданные пациентов и результаты диагностики, благодаря ее мощным функциям для манипуляции данными и аналитики.

В качестве среды разработки и визуализации использована *Jupyter Notebook*, которая выделяется своей интерактивностью и визуализацией, которые являются ключевыми при работе с алгоритмами машинного обучения и анализом данных.

Все выбранные средства имеют большое сообщество разработчиков и множество источников информации, способных облегчить разработку системы поддержки принятия решений для диагностики заболеваний пневмонией.

Результаты. Описание базы данных снимков. Набор данных организован в 3 папки («*train*», «*test*», «*val*») и содержит подпапки для каждой категории изображений (пневмония/норма). Имеется 5863 рентгеновских изображения (*JPEG*) и 2 категории (с пневмонией и нормальные). Рентгенограммы грудной клетки были отобраны из ретроспективных когорт педиатрических пациентов в возрасте от одного до пяти лет из Женского и детского медицинского центра Гуанчжоу [16]. Все рентгенограммы органов грудной клетки выполнялись в рамках клинической помощи пациентам. Для анализа все рентгенограммы грудной клетки первоначально подвергались скринингу для контроля качества путем удаления всех низкокачественных или неразборчивых сканов. Диагнозы для изображений затем были оценены двумя врачами-экспертами, прежде чем они были одобрены

для обучения системы искусственного интеллекта. Чтобы учесть любые ошибки оценки, набор оценок также был проверен третьим экспертом.

Создание модели нейронной сети. Архитектура нейронной сети определяет, как информация будет передаваться через слои сети, какие функции активации будут использоваться, какие параметры будут оптимизироваться в процессе обучения и так далее.

Для задачи диагностики пневмонии наиболее подходящей архитектурой выбрана сверточная нейронная сеть (*Convolutional Neural Network, CNN*). Она позволяет автоматически извлекать признаки из изображений и добиться высокой точности классификации.

В выборе архитектуры сверточной нейронной сети для диагностики пневмонии были учтены различные факторы, такие как размерность изображений, количество классов, количество данных для обучения, доступность вычислительных ресурсов и другие. Также важным аспектом является выбор размера ядра свертки и шага. Эти параметры определяют, каким образом будет проводиться свертка изображения и какие признаки будут извлекаться. Оптимальные значения этих параметров зависят от размера изображений, архитектуры сети и характеристик данных.

В процессе выбора архитектуры нейронной сети учтена проблема переобучения. Переобучение возникает, когда модель слишком сильно адаптируется к обучающим данным и не обобщает полученные знания на новые данные.

В ходе разработки системы было создано и обучено несколько моделей с различными случайными зёрнами, с целью получить максимальную точность прогнозов.

В итоге была создана свёрточная нейронная сеть [20], структура которой проиллюстрирована на рисунке 4.

```
1 model = Sequential()
2 model.add(Conv2D(32, (3,3), strides = 1, padding = 'same', activation = 'relu', input_shape = (150,150,1)))
3 model.add(BatchNormalization())
4 model.add(MaxPool2D((2,2), strides = 2, padding = 'same'))
5 model.add(Conv2D(64, (3,3), strides = 1, padding = 'same', activation = 'relu'))
6 model.add(Dropout(0.1))
7 model.add(BatchNormalization())
8 model.add(MaxPool2D((2,2), strides = 2, padding = 'same'))
9 model.add(Conv2D(64, (3,3), strides = 1, padding = 'same', activation = 'relu'))
10 model.add(BatchNormalization())
11 model.add(MaxPool2D((2,2), strides = 2, padding = 'same'))
12 model.add(Conv2D(128, (3,3), strides = 1, padding = 'same', activation = 'relu'))
13 model.add(Dropout(0.2))
14 model.add(BatchNormalization())
15 model.add(MaxPool2D((2,2), strides = 2, padding = 'same'))
16 model.add(Conv2D(256, (3,3), strides = 1, padding = 'same', activation = 'relu'))
17 model.add(Dropout(0.2))
18 model.add(BatchNormalization())
19 model.add(MaxPool2D((2,2), strides = 2, padding = 'same'))
20 model.add(Flatten())
21 model.add(Dense(units = 128, activation = 'relu'))
22 model.add(Dropout(0.2))
23 model.add(Dense(units = 1, activation = 'sigmoid'))
24 model.compile(optimizer = "rmsprop", loss = "binary_crossentropy", metrics = ['accuracy'])
25 model.summary()
```

Рисунок 4 – Модель свёрточной нейронной сети

Подбор параметров нейронной сети – это важный этап разработки системы интеллектуальной поддержки принятия решения для диагностики пневмонии.

Корректный выбор параметров нейронной сети позволяет достичь лучшей точности диагностики, снизить вероятность ошибок и переобучения.

Один из основных параметров нейронной сети – это гиперпараметры, которые определяют архитектуру нейронной сети и ее обучение. Некоторые гиперпараметры, такие как количество слоев, количество нейронов в слоях, функции активации, скорость обучения и размер пакетов обучения, могут значительно влиять на точность модели.

Гиперпараметры влияют на общее количество параметров и на количество обучаемых параметров. На рисунке 5 проиллюстрировано, что при реализации сверточной нейронной сети, стоящей в основе системы поддержки принятия решений для диагностики заболеваний пневмонией было получено 1 246 401 параметр, 1 245 313 из которых являются обучаемыми.

Для подбора параметров нейронной сети, учитывая выбранные архитектуру и функции потерь, использован оптимизатор *Adam*, который является

комбинацией алгоритмов *AdaGrad* и *RMSProp*. Этот оптимизатор позволяет быстрее достигать локальных минимумов функции потерь, что особенно важно при обучении сверточных нейронных сетей.

Для выбранной функции потерь – *binary cross entropy* – параметры можно подбирать, опираясь на значения метрик точности (*accuracy*), чувствительности (*recall*) и специфичности (*specificity*) на валидационной выборке.

На рисунке 6 продемонстрировано использование оптимизатора *Adam* и функции потерь *binary cross entropy* с использованием метрики точности (*accuracy*) в рамках обучения нейронной сети.

Также, для улучшения качества модели и предотвращения переобучения, используются методы регуляризации, такие как *dropout* и *L2*-регуляризация.

Важным этапом является подбор параметров методов обучения, таких как *ReduceLROnPlateau* и *EarlyStopping*, которые помогают уменьшить скорость обучения, если не происходит улучшения метрик качества, и прекратить обучение, когда модель начинает переобучаться и общая ошибка начинает расти на валидационных данных.

Реализация данных методов проиллюстрирована на рисунке 7.

```
=====
Total params: 1,246,401
Trainable params: 1,245,313
Non-trainable params: 1,088
=====
```

Рисунок 5 – Параметры нейронной сети

```
1 model.compile(Adam(learning_rate=0.0001), loss='binary_crossentropy',
2               metrics=['accuracy'])
```

Рисунок 6 – Реализация оптимизатора и функции потерь

```
3 early_stopping = callbacks.EarlyStopping(
4     monitor='val_loss',
5     patience=5,
6     min_delta=1e-7,
7     restore_best_weights=True,
8 )
9
10 plateau = callbacks.ReduceLROnPlateau(
11     monitor='val_loss',
12     factor = 0.2,
13     patience = 2,
14     min_delt = 1e-7,
15     cooldown = 0,
16     verbose = 1
17 )
```

Рисунок 7 – Реализация методов остановки и замедления обучения нейронной сети

Таким образом, при подборе параметров нейронной сети для диагностики пневмонии, учтены выбранные ранее стороны и использованы методы регуляризации и оптимизации, которые помогли достичь наилучшего качества модели.

Обсуждение. Важным этапом в разработке системы интеллектуальной поддержки принятия решения было тестирование и анализ результатов. После создания модели свёрточной нейронной сети и её обучения, модель была протестирована на тестовой выборке. В результате тестирования была получена точность предсказаний в 92% при значении функции потерь 0.25, что демонстрирует рисунок 8. Большой объем обучающей выборки и сгенерированные данные

могут оправдывать несовершенство результатов универсальностью своих прогнозов.

Модель имеет хорошую точность прогнозов и закончила своё обучение с точностью 97% на тренировочном наборе (рис. 9).

На валидационной выборке прогнозы приближены к значению 68% (рис. 10), но если учитывать точность на всех данных, то она составит приблизительно 92%, что равно значению на тестовом наборе. Также на рисунке 10 показано то, как происходило обучение модели по эпохам. На рисунке видно, как модель постепенно увеличивала процент верных прогнозов и уменьшала ошибку переобучения.

```
1 print("Loss of the model is - ", model.evaluate(x_test,y_test)[0])
2 print("Accuracy of the model is - ", model.evaluate(x_test,y_test)[1]*100 , "%")

20/20 [=====] - 7s 353ms/step - loss: 0.2496 - accuracy: 0.9199
Loss of the model is - 0.2495613396167755
20/20 [=====] - 7s 355ms/step - loss: 0.2496 - accuracy: 0.9199
Accuracy of the model is - 91.98718070983887 %
```

Рисунок 8 – Итоги обучения нейронной сети

```
Epoch 12/12
163/163 [=====] - 279s 2s/step - loss: 0.1034 - accuracy: 0.9722 - val_loss: 0.8597 - val_accuracy: 0.6875 - lr: 8.1000e-06
```

Рисунок 9 – Данные последней эпохи обучения модели

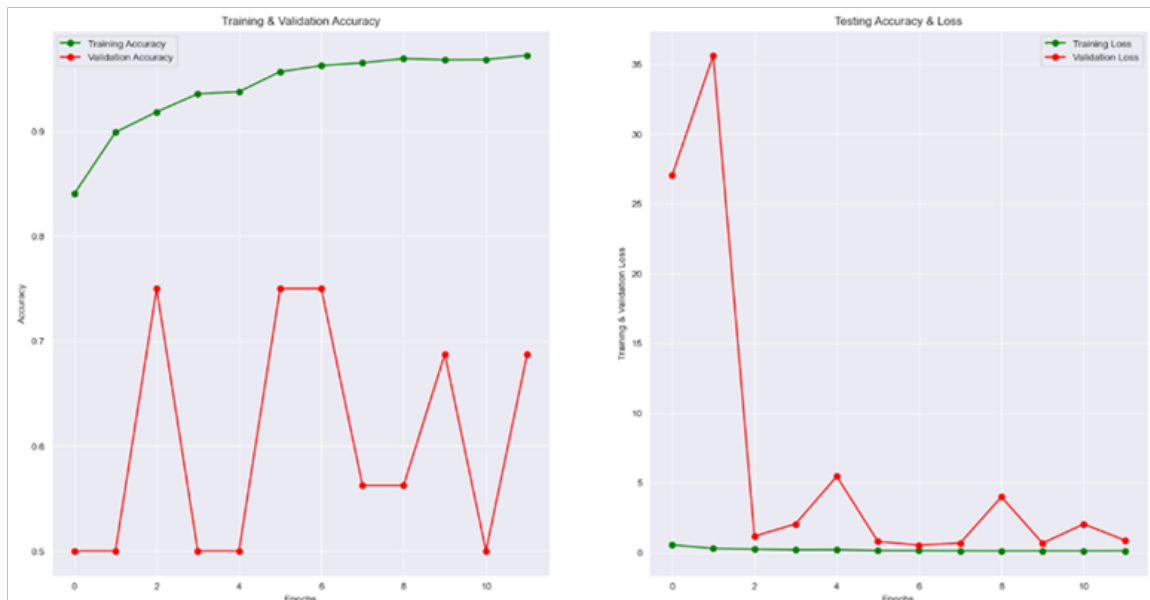


Рисунок 10 – Графики процента верных прогнозов и потери переобучения

Выводы. Система интеллектуальной поддержки принятия решения, разработанная с использованием сверточной нейронной сети [20], может оказать значительную помощь в диагностике заболеваний на основе медицинских снимков, точность предсказания

пневмонии составляет 92%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Алексеев П.П., Квятковская И.Ю. Применение нейронных сетей в системе распознавания промышленных гидробионтов в условиях повышенной флуктуации // Вестник

- Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2022. – № 2. – С. 76-86.
2. Алексеев П.П., Квятковская И.Ю. Применение нейронных сетей для распознавания принципиальных условно-графических электрических обозначений // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2021. – № 2. – С. 47-56.
3. Kvyatkovskaya I., Khasukhadzhiev A., Magomaev T. Development of a searching algorithm based on neural networks for the optimal university studies schedule // В сборнике: AIP Conference Proceedings. 1. Сер. "I International Conference ASE-I - 2021: Applied Science and Engineering, ASE-I 2021" 2021. – С. 040001.
4. Шуршев Т.В., Карлина Е.П. Моделирование функционального узла управления матричным индикатором на базе программируемой логической интегральной схемы // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2022. – № 4. – С. 42-47.
5. Шуршев Т.В., Гайрабекова Т.И. Моделирование узла распознавания символов на жидкокристаллическом дисплее с помощью модели искусственного нейрона // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2023. – № 1 (61). – С. 149-156.
8. Шуршев Т.В. Анализ систем интеллектуальной поддержки принятия решения для диагностики заболеваний // 73-я Международная студенческая научно-техническая конференция, Астрахань, 17–22 апреля 2023 года: материалы / Астраханский государственный технический университет. – Астрахань: Изд-во АГТУ, 2023. – С. 810-811. 1 CD-диск. Систем. требования: Microsoft Windows XP и выше. Загл. с титул. экрана.
7. Шуршев Т.В. Разработка технического задания на проектирование системы интеллектуальной поддержки принятия решения для диагностики пневмонии на основе машинного обучения и нейронных сетей // 73-я Международная студенческая научно-техническая конференция, Астрахань, 17–22 апреля 2023 года: материалы / Астраханский государственный технический университет. – Астрахань: Изд-во АГТУ, 2023. – С. 812-813. 1 CD-диск. Систем. требования: Microsoft Windows XP и выше. Загл. с титул. экрана.
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2023660902 Российская Федерация. Нейронная сеть для диагностики пневмонии / Шуршев Т.В.; заявитель и правообладатель Шуршев Т.В.; заявл. 03.04.2023; опубл. 25.05.2023. Реестр программ для ЭВМ – 1 с.
9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2023660903 Российская Федерация. Нейронная сеть для автоматического распознавания рукописного текста / Шуршев Т.В.; заявитель и правообладатель Шуршев Т.В.; заявл. 03.05.2023; опубл. 25.05.2023. Реестр программ для ЭВМ – 1 с.
10. Квятковская И.Ю., Во Тхи Хуен Ч., Чан К.Т. Модель и алгоритм поддержки принятия решения по выбору продуктов для рекомендации пользователю на основе метода анализа статистической импликации // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2023. – № 2. – С. 116-124.
11. Квятковский К.И., Квятковская И.Ю., Шуршев В.Ф. Интегрированные механизмы информационной поддержки принятия решений крупномасштабной территориально-распределенной экономической системы // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2010. – Т. 4. – № 2 (50). – С. 181-189.
12. Квятковская И.Ю. Этапы проблемно-ориентированной методологии поддержки принятия управленческих решений для слабоструктурированных проблем // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2009. – № 1. – С. 60-65.
13. Шуршев Т.В. Решение задачи выбора варианта промышленного сооружения при разработке морского нефтегазового месторождения // Новейшие технологии освоения месторождений углеводородного сырья и обеспечение безопасности экосистем Каспийского шельфа: материалы XIII Международной научно-практической конференции, Астрахань, 12-13 октября 2022 года / Астрахан. гос. техн. ун-т. – Астрахань: Изд-во АГТУ, 2022. – С. 393-395.
14. Заболевания органов дыхания: практическое руководство / под редакцией члена-корреспондента РАН Ж.Д. Кобалава. – Москва: ГЭОТАР-Медиа, 2022. – 248 с.
15. Ройтберг, Г.Е. Внутренние болезни. Система органов дыхания: учеб. пособие / Г.Е. Ройтберг, А.В. Струтынский. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: МЕДпресс-информ, 2015. – 512 с.
16. <https://www.Kaggle.com/>
17. Шуршев Т.В. Способ поазбацного ввода числовых значений в массив в языке программирования PYTHON // В сборнике: Информационные технологии и технологии коммуникации: современные достижения. Материалы третьей международной молодежной конференции. 2019. – С. 91.
18. Искусственный интеллект и Машинное обучение. Основы программирования на Python. М.: ЛитРес: Самиздат, 2020: дата введения 2020-18-09. – Москва: М.: ЛитРес: Самиздат, 2020, 2020. – 170 с.
19. Дж. Плас: Python для сложных задач. Наука о данных и машинное обучение / Д. В. Плас, Д. Уиттон, Т. Хасти, Р. Тибширани. – Санкт-Петербург: Питер, 2022. – 576 с.
20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2023661538 Российская Федерация. Сверточная нейронная сеть для диагностики пневмонии / Шуршев Т.В.; заявитель и правообладатель Шуршев Т.В.; заявл. 05.05.2023; опубл. 01.06.2023. Реестр программ для ЭВМ – 1 с.

Статья поступила в редакцию 21.02.2024

Статья принята к публикации 15.03.2024

УДК 004.932

EDN: RMBUIG

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПО УЛУЧШЕНИЮ РАЗРЕШЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДОРОЖНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

© Автор 2024

SPIN: 8585-7175

AuthorID: 1086300

ORCID: 0000-0001-7051-6182

ScopusID: 57221395701

ЖУРАВЛЕВ Александр Александрович, аспирант

Институт радиоэлектроники и информационных технологий-РТФ

Уральский Федеральный Университет им. Б.Н. Ельцина,

(620078, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 32, e-mail: alexander.zhuravlev@urfu.ru)

Аннотация. В связи с расширяющейся географией автомобильных дорог актуальной задачей является оценка состояния их полотна, в последние годы для анализа изображений и повышения их качества все шире применяются разнообразные методы обучения нейронных сетей. В этой связи интерес представляет сравнение возможностей различных нейронных сетей в части получения изображения высокого разрешения по критерию среднего времени достижения приемлемого результата. Для анализа выбраны нейронные сети *ESRGAN*, *EDSR*, *ESPCN*, *FSRCNN*, *LapSRN*, каждая из которых способна увеличить разрешение одновременно по ширине и высоте кадра в 4 раза, и, соответственно, количества пикселей в 16 раз. С этой целью для перечисленных сетей было проведено по 5 экспериментов с 5 разными фотографиями в каждом эксперименте, при этом количество пикселей на изображении всякий раз увеличивалось в два раза. Установлено, что наилучшими показателями по затратам времени обладает сеть *ESPCN*, сеть *FSRCNN* демонстрирует сопоставимые результаты.

Ключевые слова: сравнение, эффективность, нейронная сеть, улучшение разрешения изображения, фотография, дорожная поверхность.

COMPARISON OF THE EFFECTIVENESS OF NEURAL NETWORKS TO IMPROVE THE RESOLUTION OF ROAD SURFACE IMAGES

© Author 2024

ZHURAVLEV Alexander Alexandrovich, postgraduate student

Institute of Radioelectronics and Information Technology-RTF

Ural Federal University named after B.N. Yeltsin

(620078, Yekaterinburg, Mira St., 32, e-mail: alexander.zhuravlev@urfu.ru)

Abstract. Due to the expanding geography of highways, an urgent task is to assess the condition of their tracks. In recent years, various methods of training neural networks have been increasingly used to analyze images and improve their quality. In this regard, it is of interest to compare the capabilities of various neural networks in terms of obtaining a high-resolution image according to the criterion of average time to achieve an acceptable result. The neural networks *ESRGAN*, *EDSR*, *ESPCN*, *FSRCNN*, *LapSRN* were selected for analysis, each of which can increase the resolution simultaneously in width and height of the frame by 4 times, and, accordingly, the number of pixels by 16 times. For this purpose, 5 experiments were conducted for the listed networks with 5 different photos in each experiment, while the number of pixels in the image doubled each time. It was found that the *ESPCN* network has the best indicators in terms of time spent, the *FSRCNN* network demonstrates comparable results.

Keywords: comparison, effectiveness, neural network, image super-resolution, photo, road surface.

Для цитирования: Журавлев А.А. Сравнение эффективности нейронных сетей по улучшению разрешения изображений дорожной поверхности / А.А. Журавлев // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 1(65). – С. 58-61. – EDN: RMBUIG.

Введение. Вопросам контроля качества дорог посвящено огромное количество монографий [1-3] и журнальных статей, в которых рассматриваются методы обработки изображений дорожной поверхности. Методы можно разделить на традиционные без использования машинного обучения [4, 5] и методы с использованием нейронных сетей [6-11]. Что касается последних, то актуальна сравнительная оценка их эффективности по критериям разрешения изображения дорожной поверхности и временных затрат на их обработку. В

настоящем исследовании применительно к указанной задаче рассматриваются показатели точности и производительности нескольких нейронных сетей:

– *ESRGAN* (Enhanced Super-Resolution Generative Adversarial Network – усовершенствованная генеративно-состязательная сеть сверхвысокого разрешения) [12];

– *EDSR* (Enhanced Deep Residual Network for Single Image Super-Resolution – усовершенствованная глубокая остаточная сеть для суперразрешения одного изображения) [13];

– *ESPCN (Efficient Sub-Pixel Convolutional Neural Network)* – эффективная субпиксельная сверточная нейронная сеть [14];

– *FSRCNN (Fast Super-Resolution Convolutional Neural Network)* – быстрая сверточная нейронная сеть со сверхразрешением [15];

– *LapSRN (Laplacian Pyramid Super-Resolution Network)* – сеть сверхразрешения пирамиды Лапласа [16].

Каждая из них позволяет улучшить разрешение изображений, различаясь, однако, алгоритмами обработки изображений и порядком увеличения разрешения со временем, который может быть линейным $O(n)$, квадратическим $O(n^2)$ или кубическим $O(n^3)$. Все эти факторы могут оказывать существенное влияние на производительность системы.

Цель работы заключается в сравнении эффективности различных нейронных сетей по повышению разрешения изображений и обоснованию выбора конкретной сети для обработки изображений дорожного покрытия.

Методология. Исходным материалом для исследования послужили фотографии дорожной поверхности (на рисунках 1-5 различные фотографии формата *png* шириной и высотой по 100 пикселей), а методология базируется на эксперименте, направленном на определение зависимости степени разрешения изображений от их размеров для различных нейронных сетей. На характер зависимости влияют тип функции повышения разрешения (линейный, квадратичный, кубический), скорость ее нарастания и времени получения изображения высокого разрешения (ИВР).



Рисунок 1 – Исходные фотографии и соответствующие изображения высокого качества

Каждая из названных выше сетей увеличивает разрешение, как по высоте, так и по ширине изображения в 4 раза, т.е. общее количество пикселей исходного изображения возрастает в 16 раз. Одним из важных показателей эффективности конкретной нейросети для получения высокого разрешения можно считать среднее время, которое затрачивается на выполнение данной операции, оно зависит от размера изображения.

Для размещения программных продуктов и проведения эксперимента использовался компьютер с 64-разрядным процессором *Intel Core i5* с тактовой частотой 8 ГГц и оперативной памятью 8 гигабайт. План эксперимента для определения зависимости среднего времени получения ИВР от размера исходного изображения включал проведение для каждой нейросети серии из 5 процедур, последовательно увеличивающих количество пикселей в 2 раза: 10000 (ширина – 100, высота – 100), 20000 ($\approx 141 \times 141$), 40000 (200×200), 80000 ($\approx 283 \times 283$), 160000 (400×400).

Полученные на каждом этапе изображения с присвоением им приставок *SR (super-resolution)* сохраняются в 25 различных папках (5 нейросетей $\times$ 5 экспериментов с разными размерами изображений). Среднее время t_{cp} получения ИВР находится как

$$t_{cp} = t_{\text{общ}} / n,$$

где $t_{\text{общ}}$ – общее время получения всех изображений, n – количество изображений (в нашем случае 5).

Результаты. Результаты обработки фотографических изображений нейросетями, демонстрирующие повышение разрешения, в сопоставлении с исходными изображениями представлены на рисунке 1. Разрешение полученных ИВР по числу пикселей увеличивается в 16 раз.

Численные результаты зависимости производительности нейросетей при образовании ИВР от размера фотографии сведены в таблицу 1. Те же результаты в графическом виде показаны на рисунке 2. В некоторых случаях показатели разных нейросетей настолько близки, что их графики совпадают.

Таблица 1 – Зависимость среднего времени получения ИВР нейронной сетью от размера фотографии

Размер изображения	Время работы нейронной сети, мс				
	ESRGAN	EDSR	ESPCN	FSRCNN	LapSRN
10000	2016	5140	81	71	437
20000	2712	11524	129	136	890
40000	5552	26439	251	285	1909
80000	9823	54307	466	583	4117
160000	19951	106239	897	1137	8249



Рисунок 2 – Зависимости среднего времени работы нейросети от размера исходного изображения

Обсуждение. Как видно из графика, среднее время работы всех нейронных сетей линейно связано с размером исходного изображения [17]. Однако абсолютные значения показателей производительности и скорости нарастания зависимостей различаются. Для сравнения сетей по их эффективности составим безразмерные отношения показателей для пар нейросетей (таблица 2 – в порядке возрастания скорости роста функции). Здесь же выстроим нейронные сети в порядке возрастания затрат времени. Сопоставление численных

показателей свидетельствует о том, что наиболее эффективным является *ESPCN* (имеет наименьшую скорость нарастания, и в большинстве случаев наименьшие абсолютные временные показатели), близкими характеристиками обладает сеть *FSRCNN*. Наибольшее отношение имеет пара *EDSR* и *ESPCN* (118,4381), наименьшее – *FSRCNN* и *ESPCN* (1,2676). При увеличении размера исходного изображения данное отношение будет только увеличиваться, т.е. размер существенно влияет на производительность системы.

Таблица 2 – Отношения средних значений времени получения высокого изображения для выбранных нейронных сетей для разрешения 160000 пикселей

Нейронная сеть	ESRGAN	EDSR	ESPCN	FSRCNN	LapSRN
ESRGAN	1	0,1878	22,2419	17,5471	2,4186
EDSR	5,3250	1	118,4381	93,4379	12,8790
ESPCN	0,0450	0,0084	1	0,7889	0,1087
FSRCNN	0,0570	0,0107	1,2676	1	0,1378
LapSRN	0,4135	0,0776	9,1962	7,2551	1

Выводы. Выполнен анализ связи эффективности нейронных сетей с размером изображения дорожного полотна в пикселях. Исходным материалом послужили пять изображений дорожной поверхности формата *png* с исходным разрешением 200×200 пикселей. В качестве показателя эффективности

выбрано среднее время получения изображения высокого разрешения. Для ряда нейронных сетей проведена серия из пяти экспериментов с последовательным двукратным увеличением числа пикселей: 10000, 20000, 40000, 80000, 160000. Установлено, что наилучшей эффективностью обладает сеть *ESPCN*,

которая характеризуется наименьшей скоростью нарастания зависимости среднего времени получения ИВР от исходного разрешения, и в большинстве случаев наименьшими абсолютными показателями затрат времени. Близкие свойства демонстрирует сеть *FSRCNN*, которая обладает наименьшим абсолютным временным показателем при 10000 пикселях и несколько большей скоростью нарастания функции, чем *ESPCN*. Таким образом именно эти две нейросети могут быть рекомендованы для применения в технике оценки качества дорожного покрытия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Визильтер Ю.В. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения / Ю.В. Визильтер и др. – М.: ФИЗМАТКНИГА, 2010. – 672 с.
2. Ерош И.Л. Обработка и распознавание изображений в системах превентивной безопасности: Учебное пособие / И.Л. Ерош, М.Б. Сергеев, Н.В. Соловьев. - СПб.: ГОУ ВПО СПбГУАП, 2012. – 154 с.
3. Костяшкин Л.Н. Обработка изображений в авиационных системах технического зрения / Л.Н. Костяшкин, М.Б. Никифоров. - М.: Физматлит, 2016. – 240 с.
4. A. Danti, J.Y. Kulkarni, P.S. Hiremath. An Image Processing Approach to Detect Lanes, Pot Holes and Recognize Road Signs in Indian Roads // International Journal of Modeling and Optimization. – Vol. 2. – № 6. – 2012. – P. 658-662.
5. Fan, R. Road Damage Detection Based on Unsupervised Disparity Map Segmentation / R. Fan, M. Liu // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – November 2020. – Volume:21, Issue 11. – P. 4906–4911.
6. L.A. Silva, V.R.Q.Leithardt,V.F.L. Batista,G.V. González; J.F.D.P. Santana. Automated Road Damage Detection Using UAV Images and Deep Learning Techniques // Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. 2023, IEEE Access, Vol. 11, p. 62918-62931.
7. Road Damage Detection and Classification Using Deep Neural Networks with Smartphone Images: Road damage detection and classification // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. Vol. 33, Issue 12. – P. 1127-1141.
8. D. Arya, H. Maeda, S. K. Ghosh, D. Toshniwal, A. Mraz, T. Kashiyama, Y. Sekimoto. Deep learning-based road damage detection and classification for multiple countries // Automation in Construction, 2021, Vol.132, 103935
9. Журавлев, А.А. Повышение качества изображений дорожного покрытия на основе подходов морфологической обработки / А.А. Журавлев, К.А. Аксенов // Инженерный вестник Дона. – 2023. – № 7. – С. 404-413.
10. А.А. Журавлев. Улучшение изображений асфальтобетонных покрытий на основе методов сегментации// Инженерный вестник Дона, 2023, № 7. – С. 393-403.
11. A.A. Zhuravlev, K.A. Aksyonov. Comparison of Contour Detection Methods in Images on the Example of Photos with Road Surface Damage // Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023 IEEE Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT), 2023, P. 183-186.
12. ESRGAN: Enhanced Super-Resolution Generative Adversarial Networks [Электронный ресурс], режим доступа URL: <https://esrgan.readthedocs.io/en/latest/> (дата обращения 2.02.2024).
13. Enhanced Deep Residual Networks for Single Image Super-Resolution (EDSR) [В Интернете] // URL: <https://huggingface.co/eugeniesiow/edsr#~:text=EDSR%20upsampling%20x2,-,Model%20description,the%20end%20of%20the%20network.>
14. ESPCN [В Интернете] // URL:<https://learnopencv.com/super-resolution-in-opencv/#sec4>
15. Accelerating the Super-Resolution Convolutional Neural Network [В Интернете] // URL: <http://mmlab.ie.cuhk.edu.hk/projects/FSRCNN.html>
16. LapSRN [В Интернете] // URL:<https://learnopencv.com/super-resolution-in-opencv/#sec6>
17. Analysis of Algorithms | Big-O analysis [В Интер-нете] // URL:<https://www.geeksforgeeks.org/analysis-algorithms-big-o-analysis/>

Статья поступила в редакцию 31.01.2024

Статья принята к публикации 15.03.2024

УДК 004.932.4

EDN: QZBDSV

ПОДХОДЫ К ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ГОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

© Автор(ы) 2024

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, город Санкт-Петербург, линия 21-я В.О., дом 2, e-mail: Zaytseva_EV@pers.spmi.ru)

SPIN: 8139-9418

AuthorID: 906326

ORCID: 0000-0002-8189-782X

ResearcherID: K-5359-2017

ScopusID: 57189387806

КОЧНЕВА Алина Александровна, кандидат технических наук,

доцент кафедры «Информатики и компьютерных технологий»

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II

(199106, город Санкт-Петербург, линия 21-я В.О., дом 2, e-mail: Kochneva_AA@pers.spmi.ru)

SPIN: 6378-6951

AuthorID: 728974

ORCID: 0000-0001-8345-0979

ResearcherID: Q-4914-2016

ScopusID: 57191523004

КАТУНЦОВ Евгений Владимирович, кандидат технических наук,

первый заместитель директора института «Базового инженерного образования» – заместитель

по образовательной деятельности

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II

(199106, город Санкт-Петербург, линия 21-я В.О., дом 2, e-mail: Katuntsov_EV@pers.spmi.ru)

SPIN: 6726-1321

AuthorID: 814190

ORCID: 0000-0001-9999-8146

ScopusID: 57189368677

КИБА Мария Романовна, кандидат технических наук,

ассистент кафедры «Информационных систем и вычислительной техники»

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II

(199106, город Санкт-Петербург, линия 21-я В.О., дом 2, e-mail: Kiba_MR@pers.spmi.ru)

Аннотация. В статье рассмотрены основные подходы и особенности цифровой обработки изображений в горной промышленности, начиная от формирования видеопоследовательностей до процесса постобработки. Произведен анализ основных характеристик видеокамер с учётом особенностей съёмки в условиях производственного процесса и подбора оптимального режима работы видеокамеры. Уточнены зависимости для расчёта количественных характеристик видеокамер при видеонаблюдении в шахтах, описаны особенности цифровых изображений, полученных в шахтах. Рассмотрены основные методы и алгоритмы, применяемые при обработке таких видеоданных: цифровая фильтрация, детекция импульсного шума, сегментация, распознавание объектов. Проанализированы принципы медианной фильтрации как метода коррекции импульсного шума. Даны рекомендации по оптимизации классических методов цифровой обработки изображений для решения задач видеонаблюдения и постобработки в горной промышленности с учётом ограниченности информационных, трудовых и временных ресурсов. Указаны направления дальнейших исследований в области цифровой обработки изображений в горной промышленности, касающиеся как количественных показателей качества устройств формирования изображений и условий съёмки, так и методов и алгоритмов цифровой обработки изображений.

Ключевые слова: изображение, видеоданные, цифровая обработка, горная промышленность, нейронные сети, чувствительность, медианный фильтр.

APPROACHES TO DIGITAL IMAGE PROCESSING IN THE MINING INDUSTRY

© Автор(ы) 2024

ZAYTSEVA Ekaterina Viktorovna, candidate of technical sciences,

associate professor of the department of «Informatics and Computer Technologies»

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University

(199106, building 2, line 21st V.O., St. Petersburg, Russia, e-mail: Zaytseva_EV@pers.spmi.ru)

KOCHNEVA Alina Alexandrovna, candidate of technical sciences,

associate professor of the department of «Informatics and Computer Technologies»

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University

(199106, building 2, line 21st V.O., St. Petersburg, Russia, e-mail: Kochneva_AA@pers.spmi.ru)

KATUNTSOV Evgeny Vladimirovich, candidate of technical sciences,

First deputy director - deputy for educational activities of the «Institute of basic engineering education»

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University

(199106, building 2, line 21st V.O., St. Petersburg, Russia, e-mail: Katuntsov_EV@pers.spmi.ru)

KIBA Maria Romanovna, candidate of technical sciences,

assistant of the department of «Information Systems and Computer Science»

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University

(199106, building 2, line 21st V.O., St. Petersburg, Russia e-mail: Kiba_MR@pers.spmi.ru)

Abstract. The article discusses the main approaches and features of digital image processing in the mining industry, starting from the formation of video sequences to the post-processing process. An analysis of the main characteristics of video cameras was carried out, taking into account the peculiarities of filming in the conditions of the production process and the selection of the optimal mode of the video camera operation. The dependencies for calculating the quantitative characteristics of video cameras for video surveillance in mines have been clarified. Next, the features of digital images obtained in mines are considered and described. The main methods and algorithms used in processing such video data are analyzed: digital filtering, impulse noise detection, segmentation, object recognition. Median filtering is considered in detail as a method for correcting impulse noise. Recommendations are given for optimizing classical methods of digital image processing for video surveillance and post-processing tasks in the mining industry, taking into account the limited information, labor and time resources. Directions for further research in the field of digital image processing in the mining industry are proposed, concerning both the quantitative characteristics of the quality of image forming devices, shooting conditions, and methods and algorithms for digital image processing.

Keywords: image, video data, digital processing, mining, neural networks, sensitivity, median filter.

Для цитирования: Зайцева Е.В. Подходы к цифровой обработке изображений в горной промышленности / Е.В. Зайцева, А.А. Кочнева, Е.В. Катунцов, М.Р. Коба // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 1(65). – С. 62-67. – EDN: QZBDSV.

Введение. Горная промышленность отличается опасными условиями труда и угрозами для окружающей среды в местах добычи. С развитием видеонаблюдения одним из ключевых элементов для сбора и передачи информации о технологических процессах становятся видеокамеры. Системы видеонаблюдения размещают на важных участках производственного процесса: в шахтах, на рабочих местах персонала, в зонах опасных условий труда. Фото и видеоизображения, полученные в шахтах и разрезах, могут предоставить специалистам точную картину условий производимых работ и технического оснащения, а также воспроизвести действия персонала в той или иной критической ситуации. Наличие фото и видеоинформации ускоряет принятие решений, упрощает процесс устранения неполадок, увеличивает эффективность работы. При этом необходимо учитывать, что для хранения видеоинформации необходимы ресурсы памяти.

Прежде чем перейти к цифровой обработке изображений требуется решить задачу их формирования, прежде всего выяснить какова яркость (освещённость) светочувствительного поля датчика и какова связь этой яркости (освещённости) с освещённостью объекта. В условиях видеонаблюдения в шахтах важной характеристикой стано-

вится пороговая освещённость как техническая характеристика видеокамеры. Методики расчёта различных освещённостей систем видеонаблюдения изначально ориентировались на специалистов по телевизионным системам, они не всегда учитывали расстояния от объектива до объекта, будучи рассчитанными на широкоэкранный, а не на прикладное телевидение [1-3]. Однако при фото и видеосъёмке в шахтах расстояние от объектива до объекта часто бывает соизмеримо с размерами самого объекта [4-6].

Цифровая обработка изображений в горной промышленности основана как на классических алгоритмах Р. Гонсалеса и Р. Вудса [7] с некоторым их видоизменением, так и на алгоритмах, основанных на глубоком обучении с учетом особенностей предметной области [8-10].

Методология. При проектировании систем видеонаблюдения необходимо ответить на ряд вопросов, прежде всего о том, стоит ли вести видеонаблюдение непрерывно, либо достаточно производить видеосъёмку при определённых обстоятельствах? Кроме того, следует определить необходимые сроки хранения видеоинформации с каждого участка.

Для процесса видеонаблюдения на объекте

горной промышленности огромную роль играют различного рода датчики. Это могут быть датчики движения, датчики обнаружения различных веществ в воздухе, превышения концентрации веществ, датчики нарушения состава и т.п. [8]. Необходимость в тех или иных аппаратных средствах зависит от особенностей объекта. Также важен уровень освещённости на объекте видеонаблюдения, который зависит от особенности установленных видеокамер и источников освещения на объекте [9-12].

Способность приемника излучения обнаруживать предельно малые освещенности определяется порогом его чувствительности, пороговая освещённость в плоскости оптического изображения на ПЗС и КМОП определяется выражением [1]

$$E_l = \frac{683N\theta^2 \int_0^\infty X(\lambda, T)V(\lambda)d\lambda}{4tAS_m \int_0^\infty X(\lambda, T)S(\lambda)d\lambda}, \quad (1)$$

где 683 – пересчётный коэффициент энергетических величин в световые [лм/Вт]; t – время накопления; A – площадь пикселя; S_m – значение максимальной чувствительности матрицы; N – среднеквадратическое отклонение шумовых электронов; $V(\lambda)$ – кривая видности человеческого глаза; θ – относительное отверстие объектива; $X(\lambda, T)$ – относительная спектральная плотность светимости абсолютно черного тела (АЧТ) (T – температура абсолютно черного тела (АЧТ) или цветовая температура, °К), рассчитываемая по формуле:

$$X(\lambda, T) = \frac{M(\lambda, T)}{M_m(T)},$$

где $M(\lambda, T) = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$ – спектральная плотность светимости АЧТ (здесь c – скорость света в вакууме, h – постоянная Планка, k – постоянная Больцмана), которая имеет максимальное значение, равное $M_m(T) = 1,2865 \cdot 10^{-5} \cdot T^5$ [Вт/м³] при длине волны излучения $\lambda_m = 2897,8 \cdot 10^{-6} \cdot T^{-1}$ [м]. Формула (1) получена при условии, что объект подсвечивается источником излучения, относительная спектральная плотность светимости которого совпадает с плотностью светимости АЧТ. Пороговое значение интегральной энергетической освещённости в плоскости оптического изображения на ПЗС и КМОП равно [4]:

$$E_e = \frac{N\theta^2}{4tAS_m} \frac{\int_0^\infty X(\lambda, T)V(\lambda)d\lambda}{\int_0^\infty X(\lambda, T)S(\lambda)d\lambda}.$$

Целесообразно для определения взаимосвязи между спектральной освещённостью в плоскости изображения и спектральной освещённостью объекта учесть тот факт, что дальность от объектива до объекта (передаваемой сцены) бывает соизмеримой с расстоянием до его изображения, но не превышает его значительно. В работе [1] при определении энергетической и световой освещённостей телесный угол рассматривается как часть пространства, ограниченного некоторой конической поверхностью, а не отталкивается от способа измерения телесного угла. Для оценки пороговой световой освещенности рекомендуется использовать уточненную зависимость

$$E_l = \frac{683n}{tAS_m} \frac{\int_0^\infty X(\lambda, T)V(\lambda)d\lambda}{\int_0^\infty X(\lambda, T)S(\lambda)d\lambda} 2 \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1+d^2}} \right], \quad (2)$$

где d – отношение диаметра объектива к расстоянию до объекта; n – пороговое число сигнальных электронов.

Зависимость (2) получена при подстановке в (1) уточненной зависимости телесного угла Ω от плоского α [5]:

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos \frac{\alpha}{2}).$$

Зачастую фото и видеоданные, снятые в условиях пониженного освещения, зашумлены атмосферными осадками и остаточными продуктами производственного процесса [13-15]. Для улучшения качества итоговых фото и видеоданных используются методы цифровой обработки изображений, адаптированные к условиям съемки [13-15]. Для цифровых изображений, полученных в шахтах, характерно низкое значение среднего уровня яркости, в диапазоне 30-70 единиц (при работе с каналами цветовой модели *RGB* за 0 принимается значение чёрного цвета, за 255 значение белого цвета). Следует понимать, что для таких изображений характерны участки с наиболее высоким уровнем яркости, когда в кадр попадают источники освещения, и участки с очень низким уровнем яркости, если источника света практически нет [16-18].

Применительно к горной промышленности при цифровой обработке изображений зачастую используется пространственная фильтрация – метод коррекции изображения, при которой обработка выполняется посредством некоторого последовательного воздействия на каждую точку изображения [19-21]. Методики пространственной фильтрации используются для подавления импульсного шума, который, как правило, обусловлен угольной пылью и другими остаточными продуктами производственного процесса [22-24]. Пример изображения с таким шумом представлен на рисунке 1. Представляют интерес алгоритмы обнаружения и оценки импульсного шума с помощью масштабного параметра, определяемого по изменению значений освещенности в окрестности пикселя [25]. Для изображения, представленного на рисунке 1, масштабный параметр зашумленности составляет 8%. Этот параметр был рассчитан как отношение разности значений освещенности центрального пикселя и соседних пикселей в заданной окрестности к $(N-1)$ соседних пикселей. Оценка уровня зашумления изображения позволяет выбрать способы дальнейшей коррекции.

Результаты. Импульсный шум, присутствующий на изображении рисунка 1, в технике цифровой обработки изображений принято называть шумом типа «Соль», проявляющимся пикселями белого цвета. В большинстве встроенных библиотек представлена модель шума типа «Соль и перец» с характерными пикселями чёрного и белого цвета. Но в шахтах вследствие низкого уровня яркости снятых кадров чёрные пиксели, как правило, не просматриваются. С задачей фильтрации импульсного шума хорошо справляются фильтры поряд-

ковых статистик [25-27]. Пример результата работы медианного фильтра апертурой 3×3 с изображением (рис. 1) представлен на рисунке 2.

В результате проведенных исследований было установлено, что для изображений со средним уровнем яркости 30-70 при уровне зашумленности до 3%

достаточно медианной фильтрации апертурой 3×3 , при уровне 3-5% апертуру следует брать 5×5 , при 5-10% – 7×7 , при 10-20% – 9×9 , при зашумленности выше 20% – 11×11 . Поэтому была использована медианная фильтрация с апертурой 7×7 . Результат работы такого фильтра показан на рисунке 3.



Рисунок 1 – Изображение шахтного пространства с импульсным шумом

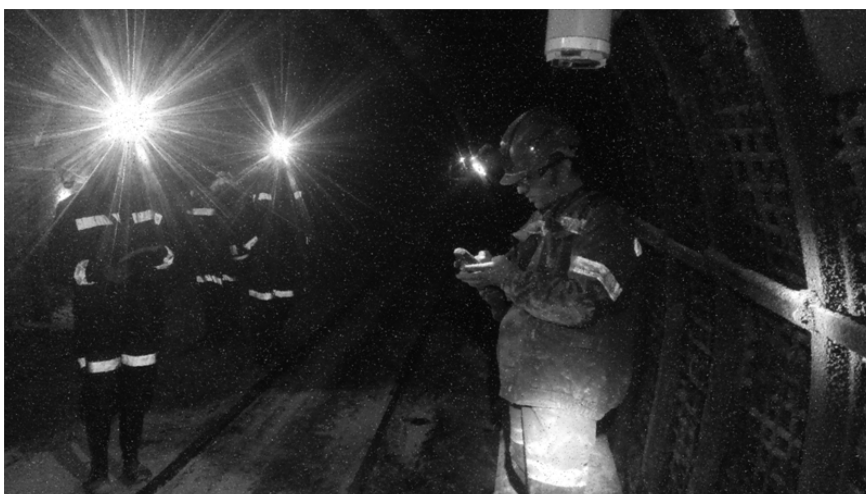


Рисунок 2 – Изображение после обработки медианным фильтром апертурой 3×3



Рисунок 3 – Изображение после обработки медианным фильтром апертурой 7×7

Обсуждение. Постобработка полученных видеоданных играет важную роль для всего процесса видеонаблюдения в горной промышленности. Чтобы сократить затраты временных, технических и человеческих ресурсов такой обработке следует уделять отдельное внимание [28-30]. Коснёмся основных особенностей постобработки видеоданных в горной промышленности

В зависимости от уровня зашумленности изображения используют или глобальную или адаптивную медианную фильтрацию. Если постоянный импульсный шум обусловлен спецификой производственного процесса, то оправдано использование глобального метода фильтрации всего изображения [31-33]. Если же подобное зашумление изображений случается время от времени, используют адаптивную фильтрацию. Тем самым обеспечивается приемлемый баланс затрат информационных ресурсов. Кроме того, важное значение имеет апертура фильтра, которая выбирается в зависимости от наблюдаемого технологического процесса. Для изображений с отдельных участков в целях экономии информационных ресурсов достаточно апертуры 3×3 , а с других участков может потребоваться апертура до 11×11 . Для обработки шахтных изображений с шумами разной интенсивности целесообразно дополнительно исследовать медианную фильтрацию с симметричной и несимметричной апертурой.

После коррекции шума методами порядковых статистик необходимо отрегулировать резкость и контрастность изображений. Не все методы контрастирования подходят к изображениям, полученным в шахтах. Одни не годятся по причинам ресурсозатратности, другие из-за специфических особенностей самих изображений [34, 35]. Поэтому анализ методов и подбор соответствующих коэффициентов является важной задачей. Коэффициенты подбираются, как правило, исходя из среднего значения яркости всего изображения, однако возможны исключения, если один фрагмент изображения освещен большим количеством источников.

Основные трудности при сегментации полученных в шахтах изображений возникают ввиду неравномерной яркости отдельных фрагментов таких изображений – максимальные значения вблизи источников освещения, и минимальные – в местах, удаленных от таких источников. Как правило, алгоритмы сегментации имеют блочную структуру, включающую алгоритмы бинаризации, фильтрации и т.п.

К процессу распознавания образов все чаще привлекают нейросетевые алгоритмы. Ключевым моментом является создание набора данных для максимально эффективного распознавания (обучение сети). В такой набор необходимо включить изображения, полученные при разной цветовой температуре источников излучения, разных углах съёмки объекта распознавания, в условиях разной видимости, при наличии/отсутствии шума. При

формировании такой выборки следует руководствоваться ГОСТ Р 55733-2013 «Освещение подземных горных выработок», определить цветовую температуру источников излучения и, исходя из полученных значений, рассчитать пороговые освещённости с использованием зависимости (2). Также необходимо провести дополнительные исследования по поводу цветовой температуры взрывозащищённых светильников, используемых в горной промышленности. При построении нейросети отдельно следует коснуться такого понятия как функция активации нейронов. Выбор функции активации напрямую зависит от конкретной задачи и архитектуры нейронной сети, он требует тщательного анализа и экспериментов.

Выводы. Выполнен анализ процессов видеонаблюдения на объектах горной промышленности. Рассмотрены условия, в которых производится видеосъёмка, характеристики, влияющие на качество видеоданных. Приведены выражения для расчёта пороговой освещённости изображения, обуславливающие работоспособность видеокамер и датчиков свет-сигнал. Были выбраны изображения с камеры, встроенной в головной светильник шахтёра в шахте. И указаны особенности таких изображений: низкий уровень освещённости в глубине помещений при повышенной яркости вблизи источников света, засоренность импульсными шумами, связанная с особенностью горного технологического процесса. На примере выбранных изображений осуществлено апробирование методов и алгоритмов, применяемых для обработки цифровых изображений, полученных в шахтах. При анализе методов учтены особенности цифровых изображений, снятых камерами, встроенными в головные светильники шахтёров. В дальнейшем планируется провести детальный анализ характеристик чувствительности видеокамер, их влияния на качество формируемого изображения и сроки самого процесса съёмки. Данный анализ позволит выработать рекомендации по техническим характеристикам осветительных приборов, применяемых в горной промышленности.

Цифровая обработка изображений в горной промышленности неразрывно связана с общим развитием информационных технологий, телевизионной техники и методов обработки изображений. При появлении новой технологии она тут же адаптируется к потребностям горной отрасли и способствует решению задач и достижению целей данной отрасли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Быков Р.Е. Основы телевидения и видеотехники: учебник для вузов / Р.Е. Быков. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. 399 с.
2. Телевидение: учебник для вузов / В.Е. Джакония [и др.]; под ред. В.Е. Джакония. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 2004. – 616 с.
3. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов: учеб. пособие для вузов / М.М. Мирошников. – Л.: Машиностроение, 1977. – 600 с.
4. Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов / Ю.Г. Якушенков. – М.: Логос, 2011. – 468 с.

5. Пустынский И.Н. Уточнение зависимости освещённости оптического изображения от освещённости объекта в телевизионных датчиках // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2009. – №1. – С. 36-39.
6. Gabov V.V., Nguyen V.X., Zadkov DA, Tran DTh (2022) Increasing the content of coarse fractions in the mined coal mass by a combine using aired cuts. Journal of Mining Institute. – Vol. 257. – P.764-770. DOI:10.31897/PMI.2022.66.
7. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
8. Новиков А.В., Паневников К.В., Писарев И.В. Многофункциональная система безопасности угольных шахт – визуализация событий (горнотехнических процессов) с рабочего места шахтера. // Горная промышленность. – 2021. – № 5. – С. 65-69. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-5-65-69.
9. Zubov V.P., Le Quang Ph. (2022) Development of resource - saving technology for excavation of flat-lying coal seams with tight roof rocks (on the example of the Quang Ninh coal basin mines). Journal of Mining Institute. – Vol. 257. – P. 795-806. DOI:10.31897/PMI.2022.72.
10. Nepsha F.S., Voronin V.A., Liven A.S., Korneev A.S. (2023) Feasibility study of using cogeneration plants at Kuzbass coal mines. Journal of Mining Institute. – Vol. 259. – P. 141-150. DOI:10.31897/PMI.2023.2.
11. Buzmakov S.A., Sannikov P.Yu., Kuchin L.S., Igoshcheva E.A., Abdulmanova I.F. (2023) The use of unmanned aerial photography for interpreting the echnogenic transformation of the natural environment during the oil field operation. Journal of Mining Institute. – Vol. 260. – P. 180-193. DOI:10.31897/PMI.2023.22.
12. Matrokhina K.V., Trofimets V.Y., Mazakov E.B., Makhovikov A.B., & Khaykin, M.M. (2023). Development of methodology for scenario analysis of investment projects of enterprises of the mineral resource complex. Journal of Mining Institute, 259. – С.112-124. doi:10.31897/PMI.2023.3.
13. Litvinenko V.S., Bowbrick I., Naumov I.A., Zaitseva Z. (2022) Global guidelines and requirements for professional competencies of natural resource extraction engineers. Implications for ESG principles and sustainable development goals. J. of Cleanel Production, 338, 1-9 (2022). doi 10.1016/j.jclepro.2022.130530.
14. Kryltsov S.B., Makhovikov A.B., Korobitcyna M.A. Novel approach to collect and process power quality data in medium-voltage distribution grids. Symmetry. – № 13. – Vol. 3. – 2021. – P. 460-460. doi 10.3390/sym13030460.
15. Makhovikov A.B., Kryltsov S.B., Matrokhina K.V., Trofimets, V. Y. (2023). Secured communication system for a metallurgical company. Tsvetnye Metally, 2023(4), 5-13. doi:10.17580/tsm.2023.04.01.
16. Kiselev V.A., Guseva N.V. (2022). Zoning pipeline routes according to the degree of danger of accidents using geoinformation systems and artificial neural networks. Mining Informational and Analytical Bulletin, (10-2). – P. 185-192. doi:10.25018/0236_1493_2022_102_0_185
17. Boikov, A.V., Savelev, R.V., Payor, V.A., Potapov, A.V. (2020). Evaluation of bulk material behavior control method in technological units using dem. part 2. CIS Iron and Steel Review, 20, 3-6. doi:10.17580/cisr.2020.02.01
18. Brooks C.N., Dobson R.J., Dean D.B., Banach D., Oommen T., Havens T.C., Ahlborn T., Cook S.J., Clover A. Evaluating the use of unmanned aerial vehicles for transportation purposes // Michigan Department of Transportation, Michigan, USA, 2015. Report No. RC-1616. – 201 p.
19. Zhang H., Tao P., Meng X., Liu M., Liu X. An optimum deployment algorithm of camera networks for open-pit mine slope monitoring // Sensors. 2021, vol. 21, no. 4, article 1148. DOI: 10.3390/s21041148.
20. Temkin I., Myaskov A., Deryabin S., Konov I., Ivannikov A. Design of a digital 3D model of transport-technological environment of open-pit mines based on the common use of telemetric and geospatial information // Sensors. 2021, vol. 21, no. 18, article 6277. DOI: 10.3390/s21186277.
21. Chaldina E., Movchan A., Kapustin V., Kuryachiy M. (2021) Software tool for modelling active vision areas of tomographic systems. Journal of Physics: Conference Series. 16. Сер. "16th International Conference on Electronic Devices and Control Systems, EDCS 2020", pp. 012015.
22. Arena F., Pau G., Severino A. An overview on the current status and future perspectives of smart cars // Infrastructures. 2020, vol. 5, no. 7, article 53. DOI: 10.3390/infrastructures5070053.
23. Kamenskiy A.V. (2022) High-speed recursive-separable image processing filters Computer Optics. – Vol. 46. – № 4. – P. 659-665.
24. Красильников Н.Н. Цифровая обработка изображений. М.: Вузская книга, 2001. – 320 с.
25. Kam H.S., Tan W.H. Noise detection fuzzy (NDF) filter for removing salt and pepper noise // Lecture Notes Comput. Sci. – 2009. – V. 5857. – P. 479-486. (Intern. visual informatics conf. 2009 (IVIC'09)).
26. Vostrikov A., Sergeev M., Balonin N., Chernyshev S.B. (2017) Digital masking using mersenne matrices and their special images. Procedia Computer Science. Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems: Proceedings of the 21st International Conference, KES 2017. – P. 1151-1159.
27. Востриков А.А., Сергеев М.Б., Литвинов М.Ю. Маскирование цифровой визуальной информации: термин и основные определения // Информационно-управляющие системы. – 2015. – № 5 (78). – С. 116-123. doi:10.15217/issn1684-8853.2015.5.116.
28. Михайлов В.В., Колпащиков Л.А., Соболевский В.А., Соловьев Н.В., Якушев Г.К. Методологические подходы и алгоритмы распознавания и подсчета животных на аэрофотоснимках // Информационно-управляющие системы. – 2021. – № 5 (114). – С. 20-32. doi:10.31799/1684-8853-2021-5-20-32.
29. Подгорнова Ю.А., Жизняков А.Л., Садыков С.С. Повышение контраста маммограмм, содержащих области рака молочной железы, на фоне жировой инволюции // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2020. – № 2 (50). – С. 136-147.
30. Подгорнова Ю.А., Садыков С.С., Самандаров И.Р., Воронцов С.А. Исследование критериев распознавания доброкачественных заболеваний на маммограммах. В сборнике: Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов и обработки изображений. Материалы XVI Международной научно-технической конференции. Редколлегия: С.Г. Емельянов, В.С. Титов (отв. ред.) [и др.]. Курск, 2021. – С. 279-281.
31. Podgomova Yu.A., Sadykov S.S (2019) Comparative analysis of segmentation algorithms for the allocation of microcalcifications on mammograms CEUR Workshop Proceedings. ITNT 2019 Proceedings of the 5th Information Technology and Nanotechnology 2019: Image Processing and Earth Remote Sensing, pp. 122-127.
32. Куприянов В.В., Бондаренко И.С. Логико-вероятностные методы моделирования сценариев аварий в шахтах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 7. – С. 114-131. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_7_0_114.
33. Грузман И.С. и др. Цифровая обработка изображений в информационных системах / ИГТУ. Новосибирск – 2000. – 156 с.
34. Сергеев М.Б., Соловьев Н.В., Стадник А.И. Методы повышения контрастности растровых изображений для систем цифровой обработки видеoinформации // Информационно-управляющие системы. – 2007. – № 1 (26). – С. 2-7.
35. Захлебн А.С., Калибеков А., Курячий М.И. Построение геопривязанного ортофотоплана участка местности по изображениям с телевизионной камеры БПЛА вертолетного типа // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. – 2020. – № 1-2. – С. 187-189.

Статья поступила в редакцию 31.01.2024

Статья принята к публикации 15.03.2024

УДК 004.4

EDN: VEWPLQ

МЕТОДИКА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ РУПОРНОЙ АНТЕННЫ ВО ВЗВЕШЕННЫЙ ГРАФ

© Авторы 2024

AuthorID: 1236864

МЕРЗЛЯКОВ Юрий Владимирович, генеральный директор

АО «ППО ЭВТ ИМ. В.А. Ревунова»

(440039, Россия, Пенза, ул. Гагарина, д. 13, e-mail: analyzer@ppoevt.ru)

SPIN: 4628-3390

AuthorID: 215576

ORCID: 0000-0003-4756-0040

ПАЩЕНКО Дмитрий Владимирович, доктор технических наук, профессор, ректор

Пензенский государственный технологический университет

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

Аннотация. Статья посвящена разработке методики описания диаграммы направленности рупорной антенны в виде взвешенного графа. Автоматизированные методы испытаний радиоэлектронных средств становятся все более важными в контексте быстрого развития электроники и автоматизации производства. Традиционные подходы к тестированию часто не могут обеспечить необходимую «точность-скорость», подчеркивая необходимость в новых методах. В предлагаемой статье рассматриваются различные методики анализа диаграмм направленности, включая современные подходы, такие как голография и апертурно-зондовые методы. В статье рассматривается вопрос, связанный с отсутствием автоматизированных комплексов для тестирования продукции радиоэлектронной борьбы, предназначенной для использования в авиации. Для решения этого вопроса авторы предлагают методику преобразования функции, описывающей диаграмму направленности рупорной антенны, во взвешенный граф. Дополнительно обсуждается восстановление трехмерного образа диаграммы направленности из двумерных срезов, а также подробно описаны методы определения ослабления сигнала при отсутствии согласованной ориентации антенн. По полученным и графически представленным распределениям видна высокая информационная значимость весов ребер, отличающихся от единицы по абсолютной величине более, чем на 0,1, что позволит с высокой вероятностью идентифицировать значение функции $F(\theta, \varphi)$, которая описывает диаграмму направленности, а значит, определить текущую ориентацию антенны. В заключение отмечено, что полученное представление нормированной диаграммы направленности рупорной антенны в виде ориентированного графа, который задается в виде совокупности нескольких матриц весов. Каждая матрица характеризуется распределением значений, которые для разных антенн могут быть различными.

Ключевые слова: восстановление трехмерного изображения, граф, диаграмма направленности, коэффициент усиления, опорно-поворотное устройство, ориентация антенн, рупорная антенна, сигнал, система координат

TECHNIQUE FOR CONVERSION OF THE DIRECTION DIAGRAM OF A HORN ANTENNA INTO A WEIGHTED GRAPH

© The Authors 2024

MERZLYAKOV Yuri Vladimirovich, general director

JSC "PPO EVT named after V.A. Revunov"

(440039, Russia, Penza, Gagarina Street, 13, e-mail: analyzer@ppoevt.ru)

PASHCHENKO Dmitry Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor, rector

Penza state technological University

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

Abstract. The paper is devoted to the development of a technique for converting the horn antenna pattern into a weighted orgraph. Automated test methods for radio-electronic equipment are becoming more and more important in the context of rapid development of electronics and production automation. Traditional testing approaches often fail to provide the required accuracy and speed, emphasizing the need for new techniques. The proposed paper reviews various techniques for directional pattern analysis, including modern approaches such as holography and aperture-probe methods. The paper addresses the issue related to the lack of automated testing facilities for electronic warfare products intended for use in aviation. To address this issue, the authors propose a technique for converting the horn antenna pattern into a weighted graph. Additionally, the reconstruction of a three-dimensional image of the pattern from two-dimensional slices is discussed, and methods for determining signal attenuation in the absence of coordinated antenna orientation are detailed. The obtained and graphically presented distributions show the high informational significance of the weights of edges that differ from unity in absolute value by more than 0.1, which will allow us to identify with high probability the value of the function $F(\theta, \varphi)$, and thus determine the current orientation of the antenna. In conclusion, it is noted that the

representation of the normalized horn antenna pattern is obtained in the form of an oriented graph, which is represented as a set of matrices of weights, each of which will be characterized by a distribution of values, which may be different for different antennas.

Keywords: three-dimensional image reconstruction, graph, pattern, gain, pivoting device, antenna orientation, horn antenna, signal, coordinate system.

Для цитирования: Мерзляков Ю.В. Методика преобразования диаграммы направленности рупорной антенны во взвешенный граф / Ю.В. Мерзляков, Д.В. Пащенко // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 1(65). – С. 68-74. – EDN: VEWPLQ.

Введение. В современном мире развитие электронной техники и автоматизации производственных процессов требует постоянного усовершенствования методов испытаний радиоэлектронных средств (РЭС). Эффективность и надежность РЭС напрямую зависят от качества проведения испытаний в ходе их производства и эксплуатации. Однако традиционные методы тестирования зачастую не могут обеспечить достаточную «точность-скорость» и стабильность процесса, что актуализирует вопрос о внедрении автоматизированных способов испытаний.

Цель работы – рассмотреть новые подходы к представлению информации о диаграмме направленности, которые позволяют улучшить решаемость задачи позиционирования антенны по параметру «точность-скорость».

Методология. Параметры антенн можно моделировать, используя математические зависимости, опирающиеся на физические закономерности. Модели, которые используются при расчете антенн, являются идеальными, с определенными допущениями, которые упрощают расчетные формулы. Однако реальное производство обеспечивает соблюдение идеала в рамках заданных погрешностей и исходя из использования имеющегося в наличии оборудования. В силу этого, возникает задача контроля качества изготавливаемого изделия и подтверждения соответствия заявленным параметрам, а также получения экспериментальным путем реальных характеристик антенны. В настоящее время существует большой набор методик для анализа диаграмм направленности (ДН) [1-3]. Современные подходы к их определению базируются на новейших техниках, таких как голография, апертурно-зондовые методы, коммутационные и модуляционные подходы, а также на бесфазовых техниках и методах фокусировки [4, 5]. Многие из этих методов применяются в комбинации, что позволяет преодолеть некоторые ограничения и повысить эффективность анализа.

Кроме этого, существует проблема, которая заключается в отсутствии автоматизированных комплексов испытаний изделий РЭС авиационного базирования [6-8]. Существующие инженерные решения не позволяют за минимальное время ориентировать систему из двух антенн на максимальный коэффициент усиления [9-13]. Известные методы поиска максимума излучения, такие как метод координатного спуска, метод градиентного

спуска и метод золотого сечения, являются классическими методами оптимизации, которые можно применять, в том числе и для поиска максимального коэффициента усиления системы из двух антенн.

Метод покоординатного спуска представляет собой элементарный подход в задачах многомерной оптимизации и демонстрирует высокую эффективность в обнаружении локальных минимумов функций. Основное направление поиска экстремума сосредотачивается вдоль осей координат, где изменяется всего одна координата в процессе оптимизации. Таким образом, сложная задача многомерной оптимизации упрощается до более простой одномерной задачи. Основной минус данного метода – необходимо пройти много шагов до достижения необходимого результата.

В процессе проведенного анализа выявлено, что имеется определенная проблема: отсутствие автоматизированных комплексов для тестирования продукции радиоэлектронной борьбы, предназначенной для использования в авиации. Нынешние технические решения не обеспечивают возможность быстрого выравнивания системы из двух антенн на достижение максимального коэффициента усиления. Для решения сложившейся проблемы необходимо разработать новую методику описания ДН. В качестве нового математического объекта, с помощью которого будет описана ДН антенны выбран взвешенный граф.

Свойства диаграмм направленности и проблема восстановления 3D диаграмм по 2D срезам. Будем считать, что в качестве принимающей антенны рассматривается эталонная антенна, характеристики которой полностью известны. В частности, будем считать известной пространственную нормированную ДН $F(\theta, \varphi)$. В случае синфазного раскрытия ДН определяется геометрическими параметрами, в частности a – ширина рупора и b – высота рупора, и длиной волны – λ .

В соответствии с апертурным методом функция может быть представлена следующим образом:

$$F(\theta, \varphi) = \frac{1 + \cos \theta}{2} F_E(\theta, \varphi) F_H(\theta, \varphi),$$

где:

$$F_E(\theta, \varphi) = \frac{\sin u_y}{u_y}, \quad u_y = \frac{\pi b}{\lambda} \sin \theta \cos \varphi;$$

$$F_H(\theta, \varphi) = \frac{\sin u_x}{1 - \left(\frac{2}{\pi} u_x\right)^2}, \quad u_x = \frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta \sin \varphi.$$

Пространственная ДН рупорной антенны представлена на рисунке 1.

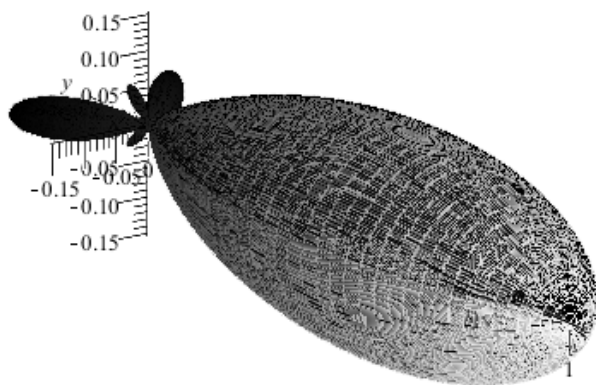
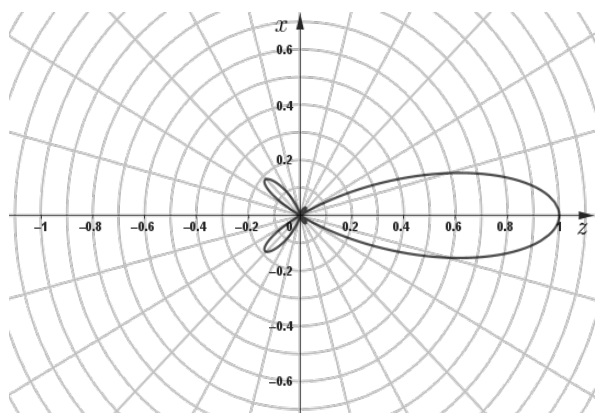


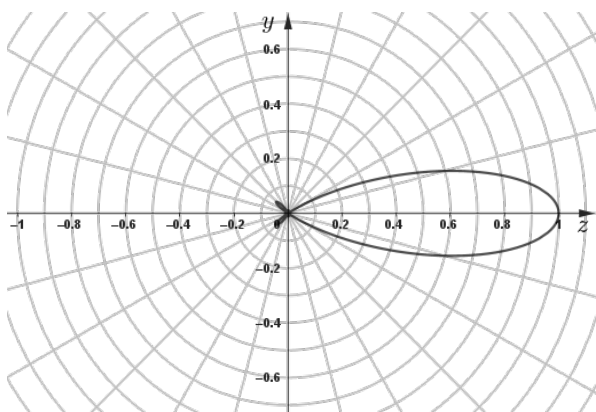
Рисунок 1 – Пространственная диаграмма направленности рупорной антенны

Весьма часто нормированную ДН представляют в логарифмическом масштабе и измеряют в децибелах [14]. В этом случае имеем следующую формулу перехода $f(\theta, \varphi) = 10 \lg F(\theta, \varphi)$.

Следует отметить, что в большинстве своем ДН представляются в виде двух срезов – горизонтального и вертикального. Для рассматриваемой на рисунке 1 диаграммы горизонтальный срез в относительном масштабе представлен на рисунке 2а.



а)



б)

Рисунок 2 – Диаграмма направленности рупорной антенны в горизонтальной (а) и в вертикальной (б) плоскости

Горизонтальный срез получается, если в пространственной диаграмме положить $\varphi=0$, то есть $F_H(\theta) = F(\theta, 0) = \frac{1+\cos\theta}{2} F_H(\theta, 0)$.

Горизонтальная ДН может быть представлена в логарифмическом масштабе в децибелах, в этом случае $f_H(\theta) = 10 \lg F_H(\theta)$.

Вертикальный срез (рис. 2б) получается, если в пространственной диаграмме положить $\varphi=\pi/2$, то есть $F_E(\theta) = F\left(\theta, \frac{\pi}{2}\right) = \frac{1+\cos\theta}{2} F_E\left(\theta, \frac{\pi}{2}\right)$.

Вертикальная ДН может быть представлена в логарифмическом масштабе в децибелах, в этом случае $f_E(\theta) = 10 \lg F_E(\theta)$.

Функция $F(\theta, \varphi)$ – нормированная диаграмма направленности, θ – угол между осью Oz и направлением сигнала (угол места), φ – угол между осью Ox и проекцией направления сигнала на плоскость xOy . Углы θ и φ определяют направление на источник сигнала или на приемник сигнала. Если $\theta \neq 0$, то наблюдается ослабление как передаваемого, так и принимаемого сигнала. Для решения задачи ориентации функцию $F(\theta, \varphi)$ будем рассматривать как заданную в прямоугольнике $-45 \leq \theta \leq 45$, $-90 \leq \varphi \leq 90$ пространства $\mathbb{R}^2$, то есть как функцию, заданную в декартовых координатах (рис. 3). Пространственная диаграмма направленности (рис. 1) в нашем случае представляет идеальную антенну и соответствует рассчитываемым характеристикам из геометрических параметров рассматриваемой антенны и, поэтому, рассматривается как теоретическая (идеальная) ДН.

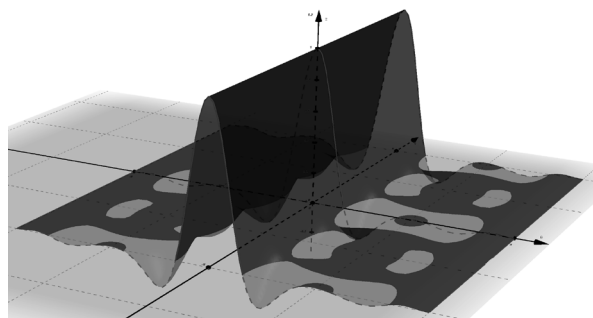


Рисунок 3 – Пространственная диаграмма направленности рупорной антенны в декартовой системе координат

Так как в большинстве случаев приходится оперировать информацией о ДН опираясь лишь на горизонтальный и вертикальный срез, возникает задача восстановления 3D образа ДН. Решение подобной задачи рассмотрено, например, в [15-19]. Выберем два подхода аппроксимации пространственной диаграммы. Первый – «классический» – основан на суммировании значений горизонтальной и вертикальной диаграмм, представленных в логарифмическом масштабе $f(\theta, \varphi) = f_H(\varphi) + f_E(\theta)$, и метод взвешенной суммы

$$f(\theta, \varphi) = \frac{w_1(\theta, \varphi)f_H(\varphi) + w_2(\theta, \varphi)f_E(\theta)}{\sqrt{w_1^2(\theta, \varphi) + w_2^2(\theta, \varphi)}},$$

где:

$$w_1(\theta, \varphi) = F_E(\theta) \cdot (1 - F_H(\varphi)),$$

$$w_2(\theta, \varphi) = F_H(\varphi) \cdot (1 - F_E(\theta)).$$

Определение ослабления сигнала в условиях отсутствия согласованной ориентации антенн.
Угол Δ определяется ориентацией обеих антенн, а не только передающей, поэтому известная формула расчета [20] не позволяет решить задачу ориентации даже при известных характеристиках антенны.

Пусть направление на передающую антенну определяется единичным вектором $\vec{a} = (a_1 \ a_2 \ a_3)^T$ заданных в системе координат, согласованной с принимающей антенной, тогда координата a_3 равна $\cos\theta$. Направление можно задать единичным вектором, который определяется углами θ и φ : $(\sin\theta \cos\varphi; \sin\theta \sin\varphi; \cos\theta)$. Рассматриваемый вектор не меняется, но при вращении принимающей антенны происходит изменение системы координат, что приводит к изменению координат вектора $\vec{a}$. Будем всегда рассматривать координаты направления относительно текущей системы координат, согласованной с принимающей антенной (рис. 4).

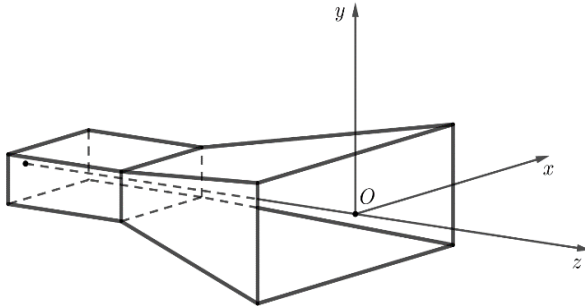


Рисунок 4 – Ориентация осей OX и OY для рупорной антенны

Если опорно-поворотное устройство (ОПУ) делает поворот на угол γ_0 в вертикальной области, то матрица перехода от старой системы координат к новой будет иметь следующий вид

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\gamma_0 & \sin\gamma_0 \\ 0 & -\sin\gamma_0 & \cos\gamma_0 \end{pmatrix}.$$

При повороте вектор направления получит новые координаты относительно новой системы координат

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\gamma_0 & \sin\gamma_0 \\ 0 & -\sin\gamma_0 & \cos\gamma_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sin\theta \cos\varphi \\ \sin\theta \sin\varphi \\ \cos\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin\theta \cos\varphi \\ \sin\theta \sin\varphi \cos\gamma_0 + \cos\theta \sin\gamma_0 \\ -\sin\theta \sin\varphi \sin\gamma_0 + \cos\theta \cos\gamma_0 \end{pmatrix}.$$

В результате новые значения углов места и азимута будут определяться из следующих соображений

$$\begin{cases} \cos\theta' = \cos\theta \cos\gamma_0 - \sin\theta \sin\varphi \sin\gamma_0, \\ \sin\theta' \sin\varphi' = \cos\theta \sin\gamma_0 + \sin\theta \sin\varphi \cos\gamma_0, \\ \sin\theta' \cos\varphi' = \sin\theta \cos\varphi. \end{cases}$$

Если первоначально $\theta=0$ то $\theta'=\gamma_0$, $\varphi'=90^\circ$,

то дальнейшие перемещения нам дают $\theta'=\gamma_0$, $\varphi'=90^\circ$, где n – число шагов поворота на угол γ_0 в вертикальной плоскости. Таким образом, поворот на дискретный угол порождает дискретную сетку на плоскости для которой возможно задание функции ДН, согласованную с равномерным распределением точек на единичной сфере.

Принимающая антенна расположена в дальней зоне передающей антенны. Пусть P_Σ – мощность излучаемой антенны, а плотность потока мощности, падающей на апертуру принимающей антенны $\Pi_{\max}$, тогда мощность приема определяется

$$P_{\text{пр}} = g \Pi_{\max} \cos\psi, \quad (1)$$

где g – апертурный коэффициент использования поверхности раскрыва (КИП), s – геометрическая площадь апертуры, ψ – угол между нормалью к апертуре приемной антенны (направление максимума ДН) и направлением на антенну передающую. Часть мощности переизлучается, а часть поступает в согласованную нагрузку. Таким образом, зная P_Σ , а значит $\Pi_{\max}$, и характеристик g и s позволяет определить из (1) угол ψ . Однако в нашем случае принимающая антенна не согласована по направлению с передающей антенной, поэтому, мощность, принимаемая антенной, определяется следующим выражением

$$P_H = \frac{P_\Sigma \cdot G}{L \cdot a_\Sigma}, \quad (2)$$

где L – потери при распространении радиоволн, $L \leq 1$, раз; G – произведение коэффициентов усиления антенн передающего и принимающего устройств в направлении, соответствующем максимальному излучению, раз; a_Σ – произведение ослаблений относительно направления максимального излучения у антенн передающего и принимающего устройств, $a_\Sigma \geq 1$, раз.

Если измерить мощность, поступающую в согласованную нагрузку после поворота принимающей антенны P'_H , ее изменение, согласно формулы (2), связано с изменением коэффициента a_Σ , который связан с ослаблением антенны в направлении отличном от направления максимума ДН по отношению к максимуму излучения. Определим a'_Σ как коэффициент изменения мощности принимаемого сигнала

$$a'_\Sigma = \frac{P'_H}{P_H}, \quad (3)$$

Заметим, что значение правой части формулы (3) определяется из ДН по изменению углов θ и φ

$$a'_\Sigma = \frac{F(\theta', \varphi')}{F(\theta, \varphi)}, \quad (4)$$

где θ' и φ' – значения угла места и азимута после поворота антенны.

В силу формул (3) и (4) можно сказать, что в условиях неизвестности ориентации как передающей, так и принимающей антенн нам для наблюдения доступны только значения отношений

мощностей принимаемого сигнала при различных положениях антенны. Для извлечения этой информации, принимая во внимание возможность согласования дискретной сетки задания функции $F(\theta, \varphi)$ с поворотами ОПУ, рассмотрим представление ДН в виде ориентированного графа, допускающем извлечение информации об изменении мощности принимаемого сигнала при заданных изменениях угла места и азимута.

Результаты. *Методика формирования взвешенного графа для описания диаграммы направленности.* Рассмотрим нормированную ДН $F(\theta, \varphi)$ на наборе точек (θ_i, φ_j) , где $\theta_i = -45 + \Delta\theta \cdot i$, $i=0, 1, \dots, N$, $N=90/\Delta\theta$, $\Delta\theta$ – шаг поворота по вертикали ОПУ; $\varphi_j = -90 + \Delta\varphi \cdot j$, $j=0, 1, \dots, M$, $M=180/\Delta\varphi$, $\Delta\varphi$ – шаг поворота по горизонтали ОПУ.

Таким образом, получаем $\{F_{ij}\}_{i=1, N, j=1, M}$ – матрицу, которая характеризует значения ДН на дискретной сетке. При осуществлении поворота ОПУ на угол места $\Delta\theta$ осуществляется переход от элемента F_{ij} к элементу F_{i+1j} . Если поворот ОПУ осуществить на угол азимута $\Delta\varphi$, осуществляется переход к элементу F_{ij+1} . Если осуществлять одновременный поворот на угол места и угол азимута, то осуществляется переход к элементу F_{i+1j+1} . Таким образом, можем представить граф, где в качестве вершин рассматривается положение антенны. Обозначим их A_{ij} , соответственно введенной выше дискретной сетке, и из каждой не крайней вершины выходит восемь ребер, соответствующих различным возможным перемещениям антенны (рис. 5).

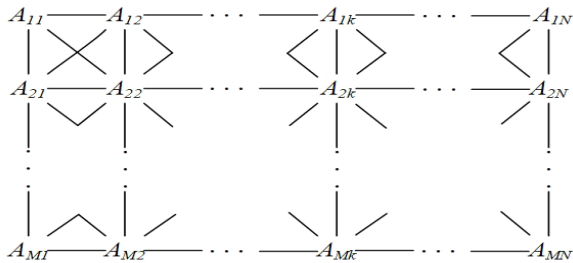


Рисунок 5 – Графическое представление графа, характеризующего диаграмму направленности

При переходе от значения F_{ij} в соседнее значение за счет поворота в положительном или отрицательном направлении на элементарные углы азимута и места $\Delta\varphi$ и $\Delta\theta$ значение функции ДН меняется и может быть охарактеризовано отношением (4). Каждому ребру дадим вес, характеризующий отношение значений функции $F(\theta, \varphi)$ в связанных ячейках. В силу свойств $F(\theta, \varphi)$ на множестве $\theta \in [-45; 45]$, $\varphi \in [-90; 90]$ вес ребра характеризует коэффициент изменения значения мощности сигнала при движении. Введем в рассмотрение восемь матриц $H_1, H_2, \dots, H_8$, которые будут описывать, соответственно, перемещения на элементарные углы азимута и места. Элементы матриц вычисляются по следующим формулам:

$$\begin{aligned} H_{1ij} &= \frac{F_{ij+1}}{F_{ij}}; & H_{2ij} &= \frac{F_{i-1j+1}}{F_{ij}}; & H_{3ij} &= \frac{F_{i-1j}}{F_{ij}}; & H_{4ij} &= \frac{F_{i-1j-1}}{F_{ij}}; \\ H_{5ij} &= \frac{F_{ij-1}}{F_{ij}}; & H_{6ij} &= \frac{F_{i+1j-1}}{F_{ij}}; & H_{7ij} &= \frac{F_{i+1j}}{F_{ij}}; & H_{8ij} &= \frac{F_{i+1j+1}}{F_{ij}}. \end{aligned} \quad (5)$$

В результате каждое введенное ребро получает вес. Распределение весов для вершины A_{ij} и смежных с ней вершин представлено на рисунке 6.

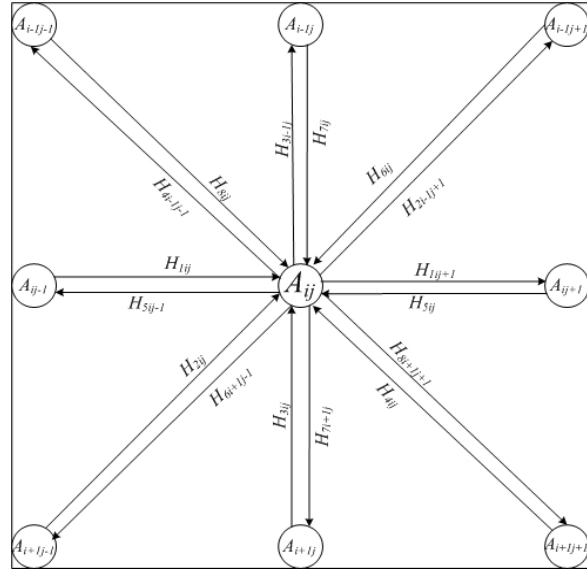


Рисунок 6 – Часть ориентированного графа: вершина A_{ij} инцидентные с ней ребра и смежные с ней вершины

Матрицы весов ребер связаны между собой, как видно из рисунка 6. Выпишем эти связи $H_{5ij-1} = H_{1ij}$, $H_{6i+1j-1} = H_{2ij}$, $H_{7i+1j} = H_{3ij}$, $H_{8i+1j+1} = H_{4ij}$. Каждая матрица весов будет характеризоваться распределением значений, которые для разных антенн могут быть различными.

На рисунке 7а представлена плотность распределения значений весов для направления H_1 в диапазоне от -1 до 3. Значения весов, рассчитанные для ДН, представленной на рисунке 1, меняются от -112 до 130. Однако, большие значения редки. Для анализа поведения распределения около веса со значением 1 на рисунке 7б представлена плотность распределения весов для направления H_1 в диапазоне от 0,5 до 1,5.

По распределениям, представленным на рисунках 7а и 7б видна высокая информационная значимость весов ребер, отличающихся от единицы по абсолютной величине более, чем на 0,1. Получение такого значения с высокой вероятностью позволит идентифицировать значение функции $F(\theta, \varphi)$, а значит, определить текущую ориентацию антенны.

Анализ рисунков 7а и 7б позволяет для каждого направления H_k выделить группы значений весов H_k^l . Интервал изменения весов разбивается точками $\min_{i,j} H_{kij} = a_0 < a_1 < \dots < a_{n_k} = \max_{i,j} H_{kij}$ на n_k полуинтервалов таким образом, чтобы в каждый интервал попало одинаковое количество значений для равномерного выбора весов ребер.

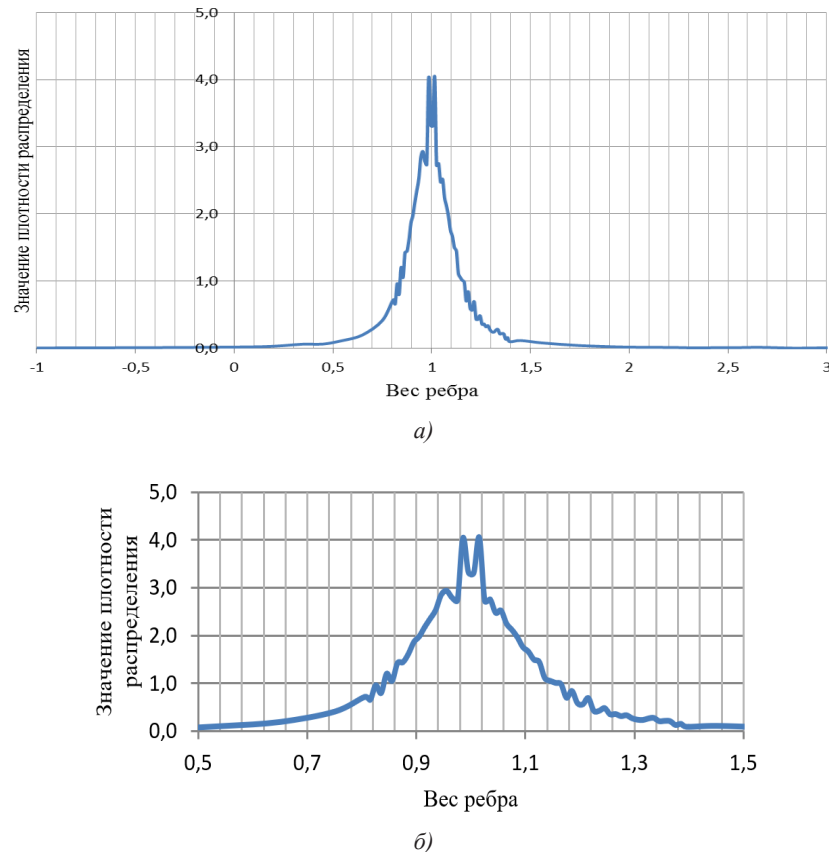


Рисунок 7 – Распределение весов для направления H_l в диапазоне от -1 до 3 (а) и в диапазоне от 0,5 до 1,5 (б)

Как видно из рисунков 7а и 7б распределение значений весов не равномерно, поэтому следует использовать интервалы разной ширины. Каждая группа характеризуется тем, что состоит из тех ребер, для которых $H_{kij} \in (a_{l-1}; a_l]$, $l = 1, 2, \dots, n_k$. Первый интервал с границей a_0 будем считать закрытым слева. Таким образом, измерительная система может отнести значение H_{kij} к одной из групп.

Обсуждение. Предложена методика представления диаграммы направленности рупорной антенны в виде взвешенного графа, согласно которой с одной стороны нормированная ДН представляется в виде ориентированного графа, представляемого в виде восьми матриц весов, которые характеризуют изменение значений функции $F(\theta, \varphi)$, а с другой позволяет охарактеризовать изменение мощности сигнала при повороте антенны на элементарные углы $\Delta\varphi$ и $\Delta\theta$.

Выводы. В данной статье получили представление нормированной диаграммы направленности в виде ориентированного графа (рис. 5), который представляется в виде восьми матриц весов, характеризующих изменение значений функции $F(\theta, \varphi)$ с одной стороны, а с другой, согласно формулам (3) и (4), изменение мощности сигнала при повороте антенны на элементарные углы $\Delta\varphi$ и $\Delta\theta$. Предложенная методика позволяет сохранить информацию об изменениях значений ДН, что даст возможность качественнее решать задачу позиционирования антенны по параметру «точность-

скорость» за счет сохранения информации об изменении значений функции $F(\theta, \varphi)$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Gusevskii V.I., Duplenkova M.D., Tsvetkova O.N. Remote reconstruction of the radiation pattern of phased array antennas // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2021. – Т. 66. – № 4. – С. 427-432.
2. Шелкоплясов С.А. Алгоритм формирования расширенной диаграммы направленности фазированной антенной решетки // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2023. – № 6 (236). – С. 276-286.
3. Шарамет А.В., Лысый А.Н. Анализ методов измерений параметров диаграммы направленности антенных систем // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. – 2023. – Т. 21. – № 6. – С. 75-83.
4. Исаков М.А., Лисинский В.П. Перспективы реконструктивных антенных измерений как основного метода приемо-сдаточных испытаний // Вестник Концерна ПВО «Алмаз-Антей». – 2015. – № 3. – С. 51-58.
5. Проскурин В.И., Ягольников С.В., Шевчук В.И. Радиолокационное наблюдение. Методы, модели, алгоритмы. М: Издательство «Радиотехника», 2017. – 368 с.
6. Бузинов И.А. Стенд автоматизированных измерений характеристик антенн // Вопросы радиоэлектроники. – 2015. – № 4. – С. 90-100.
7. Воскресенский Д. И., Овчинникова Е. В., Шмачилин П. А. Бортовые цифровые антенные решетки и их элементы. Под ред. Д.И. Воскресенского. М: Издательство «Радиотехника», 2013. – 208 с.
8. Терентьев М.А., Кочетков А.И., Набиулин М.М., Камалов И.И., Похвалов С.И., Ахмерова А.И. Автоматизированный комплекс для настройки фазированной антенной решетки // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем: Сборник научных трудов. Ульяновск. – 2019. – С. 29-32.
9. Толкачев В.И., Пикалов О.Г., Паньчев С.В., Новиков И.Г. Расчет коэффициента усиления антенн через трехмерное

представление диаграмм направленности и оценка их взаимного влияния // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2018. – Т. 5. – № 1. – С. 75-80.

10. Шестаков Е.Н., Гриц В.И., Шестаков И.Я., Малышев Д.О. Основные методы измерения коэффициента усиления антенн // Актуальные проблемы авиации и космонавтики: Сборник материалов V Международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики. В 3-х томах. Под общей редакцией Ю. Ю. Логинова. Красноярск. – 2019. – С. 500-502.

11. Наумов Н.Д. Оптимизированный метод расчета рупорной антенны // Успехи прикладной физики. – 2017. – Т. 5. – № 5. – С. 508-513.

12. Драч В.Е., Луганская А.И. Моделирование влияния преграды на характеристики рупорной антенны // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2018. – № 65. – С. 19-25.

13. Калинин Ю.Н., Чавдарь М.А. Измерение коэффициента усиления методом трех антенн в планарных сканерах ближнего поля // Вестник метролога. – 2017. – № 1. – С. 10-14.

14. Гладких А.Д., Иванов С.И., Лавров А.П. Диаграмма направленности малогабаритных рупорных антенн: расчет, компьютерное моделирование и эксперимент // Неделя науки ИЭиТ: материалы Всероссийской конференции. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Санкт-Петербург, 2022. – С. 61-64.

15. Reconstruction of 3-D Radiation Pattern from 2-D Orthogonal Slices - MATLAB & Simulink [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.mathworks.com/help/antenna/ug/3d-reconstruction-of-radiation-pattern-from-2d-orthogonal-slices.html> (дата обращения: 20.01.2024).

16. J. Chen, D. Raye, W. Khawaja, P. Sinha and I. Guvenç, "Impact of 3D UWB Antenna Radiation Pattern on Air-to-Ground Drone Connectivity," 2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), Chicago, IL, USA, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/VTCFall.2018.8690726.

17. Lan, T. et al. (2022). A UAV-Based Measurement Method for Three-Dimensional Antenna Radiation Pattern. In: Liang, Q., Wang, W., Liu, X., Na, Z., Zhang, B. (eds) Communications, Signal Processing, and Systems. CSPS 2021. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 879. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-0386-1_74

18. S. J. Maeng, H. Kwon, Ö. Ozdemir and İ. Güvenç, "Impact of 3-D Antenna Radiation Pattern in UAV Air-to-Ground Path Loss Modeling and RSRP-Based Localization in Rural Area," in IEEE Open Journal of Antennas and Propagation, vol. 4, pp. 1029-1043, 2023, doi: 10.1109/OJAP.2023.3322145.

19. Патент № 2730051C1 Российская Федерация, МПК H01Q 21/00. Способ восстановления диаграммы направленности / Гусевский В.И., Дупленкова М.Д., Никифоров Е.А., Цветкова О.Н., Чеботарев А.С.; заявитель и патентообладатель АО «ОКБ МЭИ» - № 2020108311, заявл. 26.02.2020; опубл. 14.08.2020 Бюл. №23.

20. Зырянов Ю.Т., Федюнин П.А., Белоусов О.А., Рябов А.В., Головченко Е.В. Антенны: Учебное пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Издательство «Лань», 2016 – 416 с.

Статья поступила в редакцию 22.02.2024

Статья принята к публикации 15.03.2024

УДК 634.725:631.563

EDN: IYKXBK

**ВЛИЯНИЕ ХРАНЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ КАЧЕСТВА ЯГОД
КРЫЖОВНИКА (*RIBES UVA-CRISPA* L.)**

© Автор(ы) 2023

SPIN: 7857-0301

AuthorID: 299690

ORCID: 0000-0002-5870-2350

ResearcherID: ABF-9586-2020

ScopusID: 6507308304

ГОЛУБ Ольга Валентиновна, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник*Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук**(630501, Новосибирская обл., Новосибирский район, р.п. Краснообск, e-mail: golubov@sfscs.ru)*

SPIN: 4707-3430

AuthorID: 1127163

ORCID: 0000-0002-2249-7666

МОТОВИЛОВА Наталья Владимировна, аспирант, младший научный сотрудник*Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук**(630501, Новосибирская обл., Новосибирский район, р.п. Краснообск, e-mail: motovilovanv@sfscs.ru)*

SPIN: 3051-3895

AuthorID: 471425

ORCID: 0000-0002-3756-1798

ЧЕКРЫГА Галина Петровна, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник*Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук**(630501, Новосибирская обл., Новосибирский район, р.п. Краснообск, e-mail: chekrygagp@sfscs.ru)*

SPIN: 4082-9662

AuthorID: 702348

ORCID: 0000-0002-9968-2325

ПЕТРУК Вера Александровна, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник*Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук**(630501, Новосибирская обл., Новосибирский район, р.п. Краснообск, e-mail: petrukva@sfscs.ru)*

Аннотация. Ягоды крыжовника обладают оригинальными вкусо-ароматическими характеристиками, значительным количеством биологически активных соединений. Отмечают ограниченное количество научной информации по оценке влияния условий хранения на характеристики качества ягод крыжовника. Цель работы - оценить влияние сорта, температуры и срока хранения на характеристики качества ягод крыжовника вида *Ribes uva-crispa* L. Объекты исследований – характеристики качества ягод крыжовника сортов *Сенатор* и *Розовый 2*. Ягоды хранили в контейнерах без крышки массой 500±20 г при температурах 18±2°C и 0,5±0,5°C. Методы исследований – стандартные. В результате проведенных исследований установлено, что: органолептические характеристики (привлекательность внешнего вида, величина, вкус, общая оценка качества) ягод, а также содержание в них золы, мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов в основном зависели от температуры и продолжительности хранения; потери массы ягод и количество плесневых грибов и дрожжей - от продолжительности хранения; количество растворимых сухих веществ, сахаров и пищевых волокон – температуры хранения; количество титруемых кислот и витамина C – от сорта. Рекомендуемый срок хранения ягод крыжовника сортов *Сенатор* и *Розовый 2* при температуре 18±2°C 1 сутки, 0,5±0,5°C – 2 суток.

Ключевые слова: ягоды, *Ribes uva-crispa* L., хранение, сорт, температура, продолжительность хранения, органолептические характеристики, биохимический состав, микробиологические показатели, характеристики качества.

**THE EFFECT OF STORAGE ON THE GOOSEBERRY QUALITY
CHARACTERISTICS (*RIBES UVA-CRISPA* L.)**

© The Author(s) 2023

GOLUB Olga Valentinovna, doctor of technical sciences, professor, chief researcher*Siberian Federal scientific center of agrobiotechnologies of the Russian Academy of Sciences**(630501, Russia, Novosibirsk region, Novosibirsk region working village Krasnoobsk, e-mail: golubov@sfscs.ru)***MOTOVILOVA Natalia Vladimirovna**, post-graduate student, junior researcher*Siberian Federal scientific center of agrobiotechnologies of the Russian Academy of Sciences**(630501, Russia, Novosibirsk region, Novosibirsk region working village Krasnoobsk, e-mail: motovilovanv@sfscs.ru)***CHEKRYGA Galina Petrovna**, candidate of biological sciences, leading researcher

*Siberian Federal scientific center of agrobiotechnologies of the Russian Academy of Sciences
(630501, Russia, Novosibirsk region, Novosibirsk region working village Krasnoobsk, e-mail: chekrygagp@sfsca.ru)*

PETRUK Vera Alexandrovna, candidate of agricultural sciences, leading researcher

*Siberian Federal scientific center of agrobiotechnologies of the Russian Academy of Sciences
(630501, Russia, Novosibirsk region, Novosibirsk region working village Krasnoobsk, e-mail: petrukva@sfsca.ru)*

Abstract. Gooseberry has original flavoring and aromatic characteristics, and a considerable amount of biologically active compounds. There is a little scientific information on the evaluation storage conditions influence on the gooseberry quality characteristics. The aim of the study is to evaluate the effect of the variety, temperature and shelf life on the quality characteristics of the gooseberry species *Ribes uva-crispa* L. The objects of study are the quality characteristics of gooseberry varieties *Senator* and *Pink 2*. The berries are stored in uncovered containers with a weight of 500 ± 20 g and at temperatures of $18 \pm 2^\circ\text{C}$ and $0,5 \pm 0,5^\circ\text{C}$. Research methods are standard. The results indicated that: the organoleptic characteristics (attractiveness, size, taste, general quality assessment) of berries, as well as the content of ash, mesophilic aerobic and facultative anaerobic microorganisms in them mainly depended on the temperature and storage durations; the weight loss of berries and the number of mold fungi and yeast depended on the storage duration; the amount of soluble solids, sugars and dietary fibers depended on the storage temperature; the amount of titrated acids and vitamin C depended on the variety. Shelf life of gooseberry varieties *Senator* and *Pink 2* at a temperature of $18 \pm 2^\circ\text{C}$ 1 day, and $0,5 \pm 0,5^\circ\text{C}$ – 2 days has been recommended.

Keywords: berries, *Ribes uva-crispa* L., storage, variety, temperature, storage duration, organoleptic characteristics, biochemical composition, microbiological indicators, quality characteristics.

Для цитирования: Голуб О.В. Влияние хранения на характеристики качества ягод крыжовника (*Ribes uva-crispa* L.) / О.В. Голуб, Н.В. Мотовилова, Г.П. Чекрыга, В.А. Петрук // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 1(65). – С. 75-82. – EDN: IYKXVK.

Введение. Свежие фрукты играют важную роль в питании и здоровье человека, поскольку содержат значительное количество биологически активных соединений [1-3]. Однако отмечается непостоянство качества, в том числе нутриентного состава фруктов из-за изменчивых абиотических и биотических факторов, в том числе географического места произрастания, сорта и пр. [4, 5]. В.А. Гудовским и Л.В. Кожинной разработана технология хранения ягод смородины черной сортов Тамерлан и Шалунья, произрастающих в Тамбовской области, на протяжении 30 суток в условиях регулируемой атмосферы (O_2 – 14,0-16,0%; CO_2 – 13,5-15,5%; влажность 95%), обеспечивающая не только сохранение характеристик их качества, но и замедление созревания и ингибирование грибной гнили [6]. И.М. Новиковой с соавторами, на основании комплекса исследований, определено, что ягоды земляники сортов Хоней и Корона, интродуцированные в Центральном-Чернозёмном экономическом районе, отличаются высоким потенциалом лежкоспособности при температуре $0,5^\circ\text{C}$ и относительной влажности воздуха 90% в условиях обычной атмосферы [7]. Е.Н. Киселевой с соавторами выявлены сорта ягод ремонтантной малины, произрастающие на участке многолетних насаждений малины СИФИБР СО РАН г. Иркутска, пригодные для продолжительного хранения в условиях обычной атмосферы и относительной влажности воздуха 50-60% при температурах $+1-2^\circ\text{C}$ или $0-1^\circ\text{C}$ вне зависимости от условий упаковки (закрытые или открытые контейнеры) – Евразия, Пингвин, Рубиновое ожерелье, Шапка Мономаха, Геракл [8]. Л. Brondino с соавторами установлено, что механический сбор урожая голубики сортов

Cargo® и *Top Shelf®* не оказал существенного влияния на качество плодов в течение 28 суток при температуре $2 \pm 1^\circ\text{C}$ и относительной влажности 90% [9]. В. Liu с соавторами определено, что хранение абрикосов при температуре близкой к криоскопической ($-2,5 \pm 0,2^\circ\text{C}$) является наиболее эффективным способом сохранения вкусо-ароматических соединений по сравнению с хранением при температурах 10 или 5°C [10]. L. Andreu-Coll с соавторами установлено, что хранение плодов опунции инжирной сорта *Opuntia* при температуре 2°C , относительной влажности воздуха 85-90% сохраняли свою товарность в течение 28 суток после сбора урожая [11]. P. Zahedipour с соавторами сделан вывод о том, что столовый виноград, выращенный органическим способом, не только безопасен для человека и окружающей среды, но и дает урожай с более высокой пищевой ценностью, по сравнению с традиционным способом [12]. М.Е. García-Pastor с соавторами установлено, что предуборочная обработка салицилатами, и особенно салициловой кислотой, представляет собой безопасное средство для улучшения качества плодов граната при сборе урожая и во время хранения [13].

Ягоды крыжовника (*Ribes uva-crispa* L.), в свежем или переработанном виде, употребляют в пищу из-за своих оригинальных вкусо-ароматических характеристик, достаточного количества необходимых для организма человека нутриентов и пр. [14-17]. При этом ягоды крыжовника являются неклиматическими плодами, а, следовательно, относятся к скоропортящейся продукции, научная оценка влияния условий хранения на характеристики качества ограничена. О.В. Голуб с соавторами установлено, что ягоды крыжовника сорта «Владил»,

выращенные на территории Новосибирской области, могут подвергаться контактному одностороннему замораживанию и последующему хранению при стандартных режимах [18]. J. Birgi с соавторами установлено, что наилучшими урожайностью и массой плодов отличались ягоды крыжовника, выращенные в теплицах южной Патагонии, чем в открытом грунте – различий в количестве сухих веществ и значений активной кислотности не обнаружено [19]. O. Orsavová с соавторами, в результате исследований ягод крыжовника сортов *Invicta*, *Rixanta* и *Karat* (раннеспелых), *Black Negus* (позднеспелого), выращенных в кадастровой зоне Жабнице Чешской Республики, установлено, что срок созревания не является значимым фактором, влияющим на количество сухих веществ, полифенолов, флавоноидов, антоцианов, аскорбиновой кислоты, витамина C и антиоксидантную активность; ягоды сорта *Black Negus* отличались повышенным содержанием исследуемых биологически активных соединений [20].

Следовательно, цель данного исследования состояла в том, чтобы оценить влияние сорта, температуры и срока хранения на характеристики качества (органолептические и микробиологические показатели, биохимический состав) ягод крыжовника. Из-за ограниченного количества исследований, оценивающих эти характеристики ягод крыжовника, полученная информация будет полезна при определении их послеуборочной обработки.

Методология. Объекты исследований – характеристики качества (органолептические и микробиологические показатели, биохимический состав) ягод крыжовника вида *Ribes uva-crispa* L. культурных сортов *Сенатор* и *Розовый 2*, собранные на биополигоне Федерального государственного бюджетного учреждения науки Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук. Сбор ягод осуществляли в сухую погоду, вручную в контейнеры без крышки из полиэтилентерефталата массой 500 ± 20 г.

Исследуемые ягоды крыжовника по своим характеристикам качества соответствовали требованиям второго товарного сорта согласно ГОСТ 33485-2015 «Крыжовник свежий. Технические условия»: внешний вид – ягоды свежие, вполне развившиеся, здоровые, чистые, целые, без излишней внешней влажности; ягоды разнородные по размерам, однородные по окраске (темно-красная у ягод сорта *Сенатор*, светло-красная – *Розовый 2*); без дефектов формы (округлая у ягод сорта *Сенатор*, округло-овальная – *Розовый 2*), утечки сока, с незначительной помятостью; запах и вкус – свойственные ягодам крыжовника, нежные, без постороннего запаха и (или) привкуса; вкус сладко-кислый у ягод сорта *Сенатор*, кисло-сладкий – *Розовый 2*; стадия зрелости – техническая; массовая доля ягод, не соответствующих данному товарному сорту, но соответствующего более низкому сорту,

за счет не соответствующих второму сорту – у сорта *Сенатор* и *Розовый 2* соответственно $1,2 \pm 0,5$ и $2,2 \pm 0,6\%$ при норме не более 10,0%. При этом отметили, что ягоды механически поврежденные, с незначительными повреждениями мучнистой росой отсутствовали (согласно требованиям стандарта – не более соответственно 10,0 и 5,0%). Исследуемые ягоды крыжовника: сорта *Розовый 2* превосходили ягоды сорта *Сенатор* по массе 100 ягод – 7 баллов (в среднем 550 г при норме от 401 до 600 г) против 5 баллов (в среднем 305 г при норме от 251 до 400 г); сорта *Розовый 2* обладали плотной кожицей, экзокарпом со слабым восковым налетом без опушения, сорта *Сенатор* – тонкой кожицей и практически «голым» экзокарпом.

Хранение ягод крыжовника осуществляли при параметрах физических воздействий, воспроизводимых при промышленном хранении в складских помещениях: в холодильной камере *Polair*, сплит-система *Belluna U103* (Россия) при относительной влажности воздуха 90-95% при температурах $18 \pm 2^\circ\text{C}$ и $0,5 \pm 0,5^\circ\text{C}$ в обычной атмосфере.

В ягодах крыжовника определяли: привлекательность внешнего вида, величину, вкус, общую оценку качества – используя описательный и балльный методы [21]; потери массы ягод – в процентах к первоначальной массе объекта [22]; массовую долю растворимых сухих веществ, титруемых кислот, сахаров, пищевых волокон, золы, витамина C – соответственно согласно ГОСТ ISO 2173-2013 «Продукты переработки фруктов и овощей. Рефрактометрический метод определения растворимых сухих веществ, ГОСТ ISO 750-2013 «Продукты переработки фруктов и овощей. Определение титруемой кислотности», ГОСТ 8756.13-87 «Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения сахаров», ГОСТ 34844-2022 «Продукция пищевая. Определение массовой доли пищевых волокон», ГОСТ 25555.4-91 «Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения золы и щелочности общей и водорастворимой золы», ГОСТ 24556-89 «Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения витамина C»; мезофильные аэробные и факультативно-анаэробные микроорганизмы, бактерии группы кишечных палочек, бактерий рода сальмонелл, плесневых грибов и дрожжей – соответственно согласно ГОСТ 10444.15-94 «Продукты пищевые. Методы определения количества мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов», ГОСТ 31747-2012 «Продукты пищевые. Методы выявления и определения количества бактерий группы кишечных палочек (колиформных бактерий)», МУ 4.2.723-10 «Лабораторная диагностика сальмонеллез, обнаружение сальмонелл в пищевых продуктах и объектах окружающей среды», ГОСТ 10444.12-2013 «Микробиология пищевых продуктов и кормов для животных. Методы выявления и подсчета количества дрожжей и плесневых гри-

бов». Испытания проводили в трехкратной повторности. Статистический анализ проводили с использованием программы *Excel*. Для исследования степени влияния факторов («А» – сорт ягод; «В» – температура хранения; «С» – срок хранения) на изменение исследуемого результативного признака проводили дисперсионный анализ – обработку экспериментальных данных проводили с использованием программы *SNEDECOR* [23].

Результаты. Ягодам крыжовника, как и другим плодам, при хранении характерна тенденция физиологических и физико-химических изменений (транспирация, дыхание, изменение химического состава и пр.), которые приводят к трансформации их характеристик качества за счет обезвоживания и

расходованию накопленных органических соединений и т.д.

В таблице 1 представлены результаты исследований органолептических показателей ягоды крыжовника в зависимости от сорта, температуры и продолжительности хранения, таблице 2 – биохимического состава, рисунке 1 – потеря массы. В таблице 3 представлены результаты исследований по содержанию регламентируемых ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции» микроорганизмов в ягодах крыжовника. В таблице 4 представлены результаты дисперсионного анализа влияния сорта, температуры и продолжительности хранения на характеристики качества ягод крыжовника.

Таблица 1 – Оценка органолептических показателей ягод крыжовника в процессе хранения, балл ($n = 5$)

Температура хранения, °C / срок хранения, сут	Привлекательность внешнего вида	Величина	Вкус	Общая оценка качества
сорт Сенатор				
0	5,00±0,00	4,20±0,40	5,00±0,00	4,92±0,04
18±2/1	4,00±0,00	3,80±0,40	4,00±0,00	3,98±0,04
18±2/2	3,40±0,49	3,00±0,00	3,00±0,00	3,08±0,10
18±2/3	1,40±0,49	1,60±0,49	1,20±0,40	1,44±0,22
0,5±0,5/1	4,80±0,40	4,20±0,40	4,80±0,40	4,54±0,12
0,5±0,5/2	4,00±0,00	4,00±0,00	4,00±0,00	3,88±0,04
0,5±0,5/3	4,00±0,00	3,80±0,40	3,80±0,40	3,76±0,05
сорт Розовый 2				
0	4,80±0,40	4,80±0,40	5,00±0,00	4,96±0,05
18±2/1	4,00±0,00	4,40±0,49	4,00±0,00	4,00±0,00
18±2/2	3,80±0,40	4,00±0,00	3,00±0,00	3,50±0,20
18±2/3	1,60±0,49	2,40±0,49	1,20±0,40	1,00±0,00
0,5±0,5/1	4,80±0,40	4,80±0,40	5,00±0,00	4,96±0,05
0,5±0,5/2	4,80±0,40	4,80±0,40	4,60±0,49	4,80±0,17
0,5±0,5/3	4,80±0,40	4,80±0,40	4,60±0,49	4,80±0,17

Таблица 2 – Изменения биохимического состава ягод крыжовника в процессе хранения

Температура хранения, °C / срок хранения, сут	Массовая доля					
	растворимых сухих веществ, %	сахаров, %	пищевых волокон, %	титруемых кислот (по лимонной), %	зола, %	витамина С, мг/100 г
сорт Сенатор						
0	16,3±0,7	7,8±0,3	2,92±0,12	3,6±0,1	0,87±0,04	22,014±0,881
18±2/1	22,3±0,9	14,4±0,6	2,75±0,11	3,5±0,1	0,87±0,04	23,55±0,942
18±2/2	23,6±1,0	16,2±0,7	2,61±0,10	3,3±0,1	0,96±0,04	21,023±0,841
18±2/3	33,4±1,3	26,1±1,1	2,37±0,10	3,0±0,1	1,31±0,05	15,410±0,616
0,5±0,5/1	16,3±0,7	7,8±0,3	2,91±0,12	3,6±0,1	0,87±0,04	22,102±0,884
0,5±0,5/2	16,4±0,7	7,8±0,3	2,91±0,11	3,6±0,1	0,87±0,04	22,010±0,880
0,5±0,5/3	16,4±0,7	7,8±0,3	2,9±0,12	3,9±0,1	0,87±0,04	20,539±0,822
сорт Розовый 2						
0	19,8±0,8	12,7±0,5	2,93±0,12	2,3±0,1	0,94±0,04	36,823±1,473
18±2/1	20,0±0,8	13,2±0,5	2,85±0,11	2,3±0,1	0,94±0,04	36,400±1,456
18±2/2	20,2±0,8	13,5±0,5	2,82±0,11	2,3±0,09	0,97±0,04	35,424±1,417
18±2/3	20,6±0,8	13,8±0,6	2,67±0,11	2,2±0,09	1,00±0,04	25,780±1,031
0,5±0,5/1	19,8±0,8	12,7±0,5	3,0±0,1	2,3±0,1	0,94±0,04	36,933±1,477
0,5±0,5/2	19,9±0,8	12,7±0,5	2,9±0,1	2,3±0,1	0,94±0,4	36,810±1,472
0,5±0,5/3	19,9±0,8	12,8±0,5	2,9±0,1	2,3±0,1	0,94±0,04	34,835±1,393

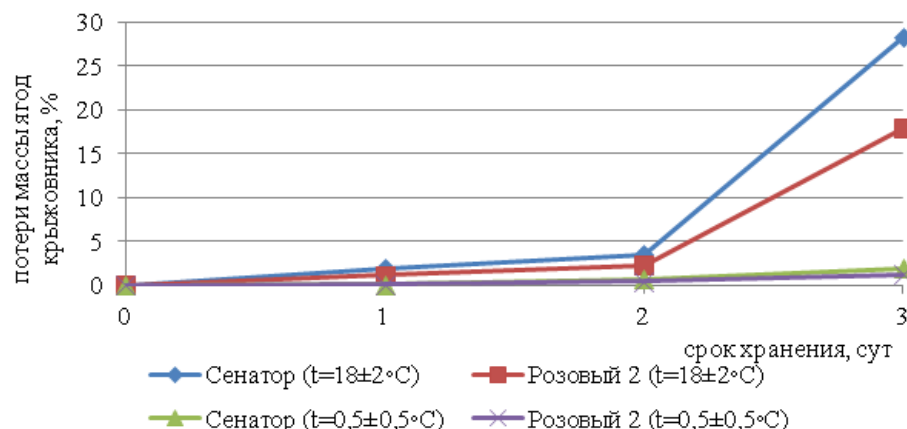


Рисунок 1 – Изменения потерь массы ягод крыжовника в процессе хранения

Таблица 3 – Изменения микробиоты ягод крыжовника в процессе хранения

Температура хранения, °С /срок хранения, сут	Среднее количество колоний, КОЕ/г		Бактерии группы кишечной палочки (10 ¹)	Патогенные микроорганизмы, в т.ч. сальмонеллы
	мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов	плесневых грибов и дрожжей		
сорт Сенатор				
0	(1,91±0,58)×10 ⁴	1,36×10 ²	отсутствуют	не обнаружены
18±2/1	(3,54±0,79)×10 ⁴	2,36×10 ²	отсутствуют	не обнаружены
18±2/2	(8,27±1,20)×10 ⁴	4,86×10 ²	отсутствуют	не обнаружены
18±2/3	(2,41±0,65)×10 ⁵	7,00×10 ²	присутствуют	не обнаружены
0,5±0,5/1	(1,10±0,44)×10 ⁴	1,68×10 ²	отсутствуют	не обнаружены
0,5±0,5/2	(1,32±0,48)×10 ⁴	5,23×10 ²	отсутствуют	не обнаружены
0,5±0,5/3	(1,77±0,56)×10 ⁴	7,27×10 ²	отсутствуют	не обнаружены
сорт Розовый 2				
0	(2,36±0,64)×10 ⁴	2,04×10 ²	отсутствуют	не обнаружены
18±2/1	(3,09±0,73)×10 ⁴	2,95×10 ²	отсутствуют	не обнаружены
18±2/2	(8,73±1,23)×10 ⁴	4,27×10 ²	отсутствуют	не обнаружены
18±2/3	(1,36±0,49)×10 ⁵	7,18×10 ²	присутствуют	не обнаружены
0,5±0,5/1	(1,86±0,57)×10 ⁴	3,32×10 ²	отсутствуют	не обнаружены
0,5±0,5/2	(4,95±0,93)×10 ⁴	6,09×10 ²	отсутствуют	не обнаружены
0,5±0,5/3	(7,50±1,14)×10 ⁴	6,23×10 ²	отсутствуют	не обнаружены
Норма согласно ТР ТС 021/2011	не более 5·10 ⁴	не более 7·10 ²	не допускаются в 0,1 г	не допускаются в 25 г

Таблица 4 – Влияние сорта, температуры и продолжительности хранения на характеристики качества ягод крыжовника

Показатель	Влияние факторов*, %						Наименьшая существенная разница [*] , %					
	A	B	C	AB	AC	BC	A	B	C	AB	AC	BC
Привлекательность внешнего вида	1,03	28,79	31,07	0,46	2,89	34,73	0,24	0,24	0,34	0,34	0,48	0,48
Величина	18,03	25,98	22,66	0,00	0,75	32,15	0,13	0,13	0,18	0,18	0,26	0,26
Вкус	0,59	31,28	36,95	1,18	0,00	28,77	0,29	0,29	0,41	0,41	0,58	0,58
Общая оценка качества	1,36	29,29	32,86	2,48	0,00	31,18	0,50	0,50	0,71	0,71	1,00	1,00
Потери массы	0,69	17,86	29,68	0,66	0,70	45,56	3,65	3,65	5,16	5,16	7,30	7,30
Количество растворимых сухих веществ	0,00	21,21	2,26	34,80	0,00	3,42	5,38	5,38	7,61	7,61	10,76	10,76
Количество сахаров	0,00	23,25	2,61	33,34	0,00	4,68	5,68	5,68	14,73	14,73	11,35	11,35
Количество пищевых волокон	7,01	34,15	15,26	8,83	0,47	25,76	0,10	0,10	0,14	0,14	0,20	0,20
Количество титруемых кислот	94,54	1,30	0,60	0,93	0,03	1,05	0,17	0,17	0,24	0,24	0,35	0,35
Количество золы	0,00	12,59	9,38	6,01	0,24	18,43	0,15	0,15	0,21	0,21	0,29	0,29
Количество витамина С	86,05	1,62	5,95	0,38	0,21	5,09	1,42	1,42	2,01	2,01	2,84	2,84
Количество мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов	0,00	21,26	27,88	5,28	0,00	21,81	5,97	5,97	8,44	8,44	11,93	11,93
Количество плесневых грибов и дрожжей	0,42	0,00	92,43	0,00	0,76	0,49	9,51	9,51	13,44	13,44	19,00	19,00

*А – сорт; В – температура хранения; С – срок хранения

Обсуждение. В результате проведенных исследований установлено, что ягоды крыжовника обоих сортов после трех суток хранения при температуре $18\pm 2^\circ\text{C}$ проявили видимые изменения внешнего вида, величины, цвета – становились сморщенными, теряли блеск и насыщенность цвета и пр. (табл. 1). Изменения наиболее выражены для ягод сорта *Сенатор* по сравнению с сортом *Розовый 2*, что, скорее всего, можно объяснить особенностями его экзокарпа – отсутствием воскового налета. Ягоды крыжовника после трех суток хранения при температуре $0,5\pm 0,5^\circ\text{C}$ практически не претерпевали подобных изменений.

В процессе хранения при температуре $18\pm 2^\circ\text{C}$ снижались органолептические оценки за показатель «привлекательность внешнего вида» у ягод сорта *Сенатор* с 5,00 (свежесобранных) до 1,40 (к концу третьих суток хранения) баллов, сорта *Розовый 2* – соответственно с 4,80 до 1,60 баллов. При хранении ягод обоих сортов органолептические оценки за данный показатель незначительно изменялись у ягод сорта *Сенатор* (с 5,00 баллов свежесобранных до 4,00 баллов к концу третьих суток хранения) и не изменялись у сорта *Розовый 2* (4,80 баллов).

Величина ягод, вне зависимости от сорта, практически не изменялась в процессе хранения при температуре $0,5\pm 0,5^\circ\text{C}$ (органолептическая оценка сорта *Сенатор* – снижается с 4,20 до 3,80 баллов; сорта *Розовый 2* – не изменяется, 4,80 балла), но изменялась при температуре $18\pm 2^\circ\text{C}$ (снижается с 4,20 до 3,00 баллов у сорта *Сенатор*, с 4,80 до 2,40 баллов у сорта *Розовый 2*).

Первоначально вкус ягод сорта *Сенатор* был сладко-кислым (ощущалась сладость и кислота, с преобладанием последней), а сорта *Розовый 2* – кисло-сладким (ощущалось присутствие кислоты и сахара, но ощущение сладкого преобладало), и оценивались в 5,00 баллов. В процессе хранения при температуре $18\pm 2^\circ\text{C}$ вкус ягод обоих сортов портился, становился плохим, не типичным – органолептическая оценка снижалась до 1,20 баллов к концу третьих суток хранения. При хранении ягод при температуре $0,5\pm 0,5^\circ\text{C}$ вкус ягод практически не претерпевал изменения у ягод сорта *Розовый 2*, к концу исследуемого периода хранения органолептическая оценка снижалась до 4,60 баллов, но становился посредственным у ягод сорта *Сенатор* – органолептическая оценка снижалась до 3,80 баллов.

Общая органолептическая оценка качества, которая не является средней арифметической оценкой учета величины, привлекательности и вкуса, а представляет собой общее впечатление о ягодах, наиболее высокая у ягод сорта *Розовый 2*, хранившихся при температуре $0,5\pm 0,5^\circ\text{C}$ – к концу исследуемого периода хранения снизилась в среднем на 8%, немного ей уступала у ягод сорта *Сенатор*, хранившихся при этой же температуре, снизилась на 24% – ягод хорошего качества.

Наихудшие оценки отметили у ягод, хранившихся при температуре $0,5\pm 0,5^\circ\text{C}$, снизились на 71 и 80% соответственно для сортов *Сенатор* и *Розовый 2* к концу третьих суток хранения – ягоды не пригодны для употребления в свежем виде.

Из данных рисунка 1 видно, что в процессе исследуемого периода хранения ягоды крыжовника обоих сортов теряли свою массу. При температуре хранения $18\pm 2^\circ\text{C}$ наибольшие потери массы отмечали у ягод сорта *Сенатор*, по сравнению с сортом *Розовый 2* – в 1,7, 1,5 и 1,6 раз соответственно после первых, вторых и третьих суток хранения. Наименьшие потери массы наблюдали у ягод после трех суток хранения при температуре $0,5\pm 0,5^\circ\text{C}$ – в среднем 1,55%.

Из данных таблицы 2 видно, что количество растворимых сухих веществ в ягодах крыжовника обоих сортов при температуре хранения $18\pm 2^\circ\text{C}$ за счет гидролиза полисахаридов (пищевые волокна превращаются в моно и дисахариды) в результате ферментативной активности изменялось. Интенсивность данных процессов зависела от сортовых особенностей ягод. Так, в процессе хранения ягод сорта *Сенатор* количество растворимых сухих веществ увеличивалось в среднем в 1,36, 1,45 и 2,05 раза соответственно к концу первых, вторых и третьих суток хранения по сравнению с первоначальными данными. У ягод сорта *Розовый 2* содержание растворимых сухих веществ в первые двое суток практически не изменялось, после трех суток хранения увеличилось в среднем в 1,04 раза. Аналогичные тенденции характерны и для количественного содержания сахаров: у ягод сорта *Сенатор* увеличение от первоначальных значений составило в среднем в 1,8, 2,1 и 3,4 раза соответственно к концу первых, вторых и третьих суток хранения; сорта *Розовый 2* – в среднем в 1,09 раза к концу третьих суток хранения. Количество пищевых волокон в процессе хранения ягод сорта *Сенатор* снижалось на 5,8, 10,6 и 18,8% соответственно к концу первых, вторых и третьих суток хранения, сорта *Розовый 2* – 2,7, 3,8 и 8,9% соответственно. При этом необходимо отметить, что количество органических кислот в процессе исследуемого периода хранения снижалось за счет их использования в качестве субстратов в дыхательных процессах. Количественное содержание органических кислот в ягодах сорта *Сенатор* в процессе хранения снижалось на 1,9, 9,4 и 16,9% соответственно к концу первых, вторых и третьих суток хранения, сорта *Розовый 2* – 0,9, 2,2 и 6,1% соответственно. Сахарокислотный индекс ягод крыжовника (соотношение сахаров к органическим кислотам) к окончанию третьих суток хранения при температуре $18\pm 2^\circ\text{C}$ увеличивался практически в 4 раза у сорта *Сенатор*, 1,2 раза сорта *Розовый 2*. При хранении ягод обоих сортов при температуре $0,5\pm 0,5^\circ\text{C}$ значения данного показателя находились в пределах ошибки опыта. Кажущиеся увеличения количества витамина C в первые сутки хранения, в

пересчете на количество растворимых сухих веществ во время хранения связаны, на наш взгляд, с потерей воды, а не с фактическим его увеличением. Большие потери аскорбиновой кислоты характерны для ягод сорта *Сенатор* они составили в среднем 29,6, 46,1 и 88,9% соответственно к концу первых, вторых и третьих суток хранения, меньшие у сорта *Розовый 2* – 4,0, 10,3 и 60,8% соответственно.

Данные таблицы 2 свидетельствуют о том, что количество растворимых сухих веществ, в том числе сахаров, пищевых волокон, органических кислот, в ягодах крыжовника обоих сортов хранившиеся при температуре $0,5 \pm 0,5^\circ\text{C}$ практически не изменялось, результаты исследований находились в пределах ошибки опыта, что, скорее всего, связано со снижением частоты дыхания, т.е. уменьшением метаболических процессов в исследуемых образцах. Отметим, что в первые сутки хранения количество витамина С в исследуемых ягодах увеличивается примерно на 0,3%. Можно предположить, что витамин С продолжал синтезироваться из моносахаридов. К концу вторых суток хранения ягод обоих сортов потери нутриента от первоначального количества составили в среднем 0,5%, а к концу третьих суток в среднем 10,4%. Потери нутриента в последующие сутки хранения связаны, на наш взгляд, с его окислением. Стоит отметить, что потери витамина С при пониженных температурах хранения ($0,5 \pm 0,5^\circ\text{C}$) ягод обоих сортов ниже, чем при повышенных ($18 \pm 2^\circ\text{C}$).

Данные таблицы 3 свидетельствуют о том, что ягоды крыжовника обоих сортов целесообразно хранить при температуре $18 \pm 2^\circ\text{C}$ не более одних суток, так как количество мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов превысило регламентируемые требования, санитарно-значимых микроорганизмов, где на третьи сутки выявлены бактерии группы кишечной палочки. При температуре $0,5 \pm 0,5^\circ\text{C}$ ягоды крыжовника обоих сортов целесообразно хранить не более 2-х суток, поскольку в микробиоте ягод сорта *Сенатор* количество плесневых грибов и дрожжей, в микробиоте сорта *Розовый 2* мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов превышало регламентируемые требования.

В результате проведенного дисперсионного анализа установили (табл. 4), что фактор «сорт» оказывал существенное влияние в процессе хранения на количество титруемых кислот и витамина С в ягодах крыжовника (соответственно 94,54 и 86,05%), фактор «температура хранения» – количество растворимых сухих веществ, сахаров и пищевых волокон в ягодах (соответственно 21,21, 23,25 и 34,15%), фактор «срок хранения» – потери массы, количество плесневых грибов и дрожжей (соответственно 29,68 и 92,43%). Практически равное влияние факторы «температура хранения» и «срок хранения» оказывали на привлекательность внешнего вида, величину, вкус, общую оценку

качества, количество золы, мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов ягод крыжовника. Взаимодействие факторов «сорт» и «температура хранения» оказывал существенное влияние на количество растворимых сухих веществ и сахаров в процессе хранения ягод (соответственно 34,80 и 33,34%), факторов «температура хранения» и «срок хранения» – привлекательность внешнего вида, величину, вкус, общую оценку качества, потери массы, количество пищевых волокон, мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов (соответственно 34,73, 32,15, 27,77, 31,18, 45,56, 25,76, 18,43 и 21,81%). Взаимодействие факторов «сорт» и «температура хранения» оказывало незначительное влияние на исследуемые характеристики ягод в процессе хранения. На содержание титруемых кислот, витамина С, плесневых грибов и дрожжей взаимодействие исследуемых факторов было статистически не значимым.

Выводы. Таким образом, на основании проведенных органолептических, физико-химических и микробиологических исследований установлено, что хранение при температуре $18 \pm 2^\circ\text{C}$ обеспечивало сохранность характеристик качества ягод крыжовника сортов *Сенатор* и *Розовый 2*, упакованных в контейнеры без крышки из полиэтилентерефталата массой 500 ± 20 г, в течение 1 суток после сбора урожая, при температуре $0,5 \pm 0,5^\circ\text{C}$ – 2 суток. На наш взгляд, необходимы исследования, чтобы оценить, как долго можно сохранить товарное качество ягод крыжовника с другими условиями (модифицированной или регулируемой атмосферах и пр.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Акимов М.Ю. Новые селекционно-технологические критерии оценки плодовой и ягодной продукции для индустрии здорового и диетического питания // Вопросы питания. – 2020. – Т. 89, № 4. – С. 244-254. <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2020-10057>
2. Newman G. Fruit and vegetables: prevention and cure? A prescription for healthy living. – Academic Press, 2021: 243-253. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821573-9.00022-9>
3. Yahia E.M., Fonseca J.M. and Kitinoja L. Postharvest losses and waste. Postharvest technology of perishable horticultural commodities, 2019: 43-69. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813276-0.00002-X>
4. Hu W., Sarengaowa and Feng K. Effect of Edible Coating on the Quality and Antioxidant Enzymatic Activity of Postharvest Sweet Cherry (*Prunus avium* L.) during Storage. Coatings. 2022; 12(5): 581. <https://doi.org/10.3390/coatings12050581>
5. Yan Y., Pico J., Sun B., Pratap-Singh A., Gerbrandt E. and Castellarin S.D. Phenolic profiles and their responses to pre-and post-harvest factors in small fruits: a review. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2021; 1-28. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1990849>
6. Гудковский В.А. Хранение плодов смородины черной в регулируемой атмосфере /В.А. Гудковский, Л.В. Кожина // Плодоводство и ягодоводство России. – 2019. – Т. 58. – С. 18-27. DOI 10.31676/2073-4948-2019-58-18-27.
7. Влияние ботанического сорта ягод земляники садовой на биологическую стабильность при хранении /И.М. Новикова, О.М. Блинникова, Л.Г. Елисеева, А.И. Иванникова // Технологии и товароведение сельскохозяйственной продукции. – 2019. – № 1(12). – С. 69-73.
8. Оценка пригодности ягод ремонтантной малины

к хранению при различных температурах в условиях обычной атмосферы /Е.Н. Киселева, М.А. Раченко, Л.Е. Камышова, А.М. Раченко //Современное садоводство. – 2021. – № 1. – С. 36-47. DOI 10.52415/23126701_2021_0105.

9. Brondino L., Briano R., Massaglia S. and Giuggioli N.R. Influence of harvest method on the quality and storage of highbush blueberry. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2022; 10: 100415. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100415>

10. Liu B., Jiao W., Wang B., Shen J., Zhao H. and Jiang W. Near freezing point storage compared with conventional low temperature storage on apricot fruit flavor quality (volatile, sugar, organic acid) promotion during storage and related shelf life. *Scientia Horticulturae*, 2019; 249:100-109. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.01.048>

11. Andreu-Coll L., García-Pastor M.E., Valero D., Amorós A., Almansa M.S., Legua P. and Hernández F. Influence of Storage on Physiological Properties, Chemical Composition, and Bioactive Compounds on Cactus Pear Fruit (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.). *Agriculture*. 2021; 11(1):62. <https://doi.org/10.3390/agriculture11010062>

12. Zahedipour P., Asghari M., Abdollahi B., Alizadeh M. and Danesh Y.R. A comparative study on quality attributes and physiological responses of organic and conventionally grown table grapes during cold storage. *Scientia horticulturae*, 2019; 247: 86-95. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.11.077>

13. Garcia-Pastor M.E., Zapata P.J., Cfstillo S., Martínez-Romero D., Guillén F., Valero D. and Serrano M. The effects of salicylic acid and its derivatives on increasing pomegranate fruit quality and bioactive compounds at harvest and during storage. *Frontiers in Plant Science*, 2020; 11: 668. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00668>

14. Биологическая ценность плодов и ягод российского производства /М.Ю. Акимов, В.В. Бессонов, В.М. Коденцова и др. //Вопросы питания. – 2020. – Т. 89. – № 4. – С. 220-232. DOI 10.24411/0042-8833-2020-10055

15. Исследование антиоксидантного комплекса перспективных и районированных в Свердловской области сортов крыжовника / О.В. Чугунова, А.В. Вяткин, А.В. Арисов, Е.М. Чеботок //Ползуновский вестник. – 2022. – № 3. – С. 108-116. – DOI 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.03.015.

16. Титова Ю.Г. Качественный анализ российских сортов крыжовника, включенных в Госреестр селекционных достижений / Ю.Г. Титова, О.В. Курашев //Современное садоводство. – 2022. – № 3. – С. 24-37. DOI 10.52415/23126701_2022_0303.

17. Erbil N., Murathan Z., Arslan M. and İlçim A. Bektashi Üzümlü (Ribes uva-crispa L.) ve Dağ Frenk Üzümlü (Ribes alpinum L.) Bazı Biyokimyasal İçerik ve Biyolojik Aktiviteleri Yönünden Karşılaştırılması. *Adnan Menderes Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 2021; 18(2): 197-203. <https://doi.org/10.25308/aduziraat.907968>

18. Влияние процессов замораживания и последующего хранения на качество ягод крыжовника /О.В. Голуб, Г.П. Чекрыга, А.В. Паймулина и др. //Индустрия питания. – 2022. – Т. 7. - № 1. – С. 14-23. DOI 10.29141/2500-1922-2022-7-1-2.

19. Birgi J., Peri P.L. and Gargaglione V. Raspberries and gooseberries in south Patagonia: Production, fruit quality, morphology and phenology in two environmental conditions. *Scientia Horticulturae*, 2019; 258: 108574. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108574>

20. Orsavová O., Hlaváčová I., Mlček J., Snopek L. and Mišurcová L. Contribution of phenolic compounds, ascorbic acid and vitamin E to antioxidant activity of currant (*Ribes* L.) and gooseberry (*Ribes uva-crispa* L.) fruits. *Food chemistry*, 2019; 284: 323-333. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.01.072>

21. Программа и методика сортоизучения плодовых, ягодных и орехоплодных культур /Под общ. Ред. Е.Н. Седова, Т.П. Огольцовой. – Орел: ВНИИСПК, 1999. – 608 с.

22. Гусейнова Б.М. Изменение качества плодов алычи при быстром замораживании и длительном холодном хранении с учетом сортовых особенностей /Б.М. Гусейнова, Т.И. Даудова //Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13. – №. 1-4. – С. 817-820.

23. Сорокин О.Д. Прикладная статистика на компьютере /О.Д. Сорокин //ГУП РПО СО РАСХН. - Краснообск, 2004. – 162 с.

Статья поступила в редакцию 06.12.2023

Статья принята к публикации 15.03.2024

УДК 53.06, 633.111.1, 664.7

EDN: OZBNAJ

**СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ПРИ ОБРАБОТКЕ СЕМЯН ПШЕНИЦЫ НИЗКИМИ
ДОЗАМИ γ -ИЗЛУЧЕНИЯ**

© Автор(ы) 2024

SPIN: 7663-1784

Author ID: 450578

ORCID: 0000-0002-4777-1465

Researcher ID: C-3922-2018

Scopus ID: 57203766629

ТИМАКОВА Роза Темерьяновна, доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры пищевой инженерии*Уральский государственный экономический университет**(620144, Россия, Екатеринбург, улица 8 Марта/Народной воли, 62/45, e-mail: trt64@mail.ru)*

ORCID: 0000-0001-9269-9717

ИЛЬЮХИН Руслан Васильевич, старший преподаватель кафедры безопасности информационных систем
Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А.Бонч-Бруевича
(192232, Россия, Санкт-Петербург, проспект Большевиков, 22 к. 1, e-mail: iruslan@sputniksattv.ru)

Аннотация. Применение технологии низкодозового γ -излучения для биостимуляции зерна пшеницы на примере мягкой яровой пшеницы районированного на Урале сорта «Екатерина» показывает возможности дальнейшего использования обработанного излучением зерна в мукомольном производстве. В рамках исследований установлено улучшение технологических качеств муки, полученной из облученного зерна, в результате укрепления клейковины за счет увеличения массовой доли сырой клейковины до 29,05% и повышения ее качества до 68 ед. ИДК. Установлено увеличение содержания сырого протеина на 0,71%, сырого жира на 0,19% и сырой клетчатки на 0,15%. После облучения низкими дозами γ -излучения (11-15 Гр) произошло изменение в структуре углеводов: уменьшение массовой доли крахмала на 1,38% и соответствующее увеличение сахаров и пентозанов – на 0,78% и 0,60%, влияющие на структурно-механические свойства теста. Выявлено увеличение массовой доли сырого протеина на 0,71% с улучшением соотношения незаменимых аминокислот к заменимым аминокислотам с 1,00:1,32 в необлученных образцах до 1,00:1,21 в облученных образцах, отмечено повышение аминокислотного скоры белка с $128,85 \pm 0,09\%$ до $134,67 \pm 0,06\%$. Увеличение доли незаменимых аминокислот и соответствующее повышение аминокислотного скоры по всем незаменимым аминокислотам, включая лизин и треонин, имеющие аминокислотный скор 95,81% и 82,11% соответственно, позволяет сделать вывод о возможности применения низких доз γ -излучения для биоактивации зерна и последующего повышения биологической ценности пшеничной муки, производимой из облученной мягкой яровой пшеницы сорта «Екатерина». Требуется последовательное продолжение исследований по облучению разными дозами γ -излучения пшеницы, а также по оценке качества хлеба из обработанной излучением муки.

Ключевые слова: биоактивация, низкие дозы, γ -излучение, мягкая яровая пшеница сорта «Екатерина», Гр, технологические качества, аминокислотный скор.

**SYNERGISTIC EFFECT IN THE TREATMENT OF WHEAT SEEDS WITH LOW
DOSES OF γ -RADIATION**

© The Author(s) 2024

TIMAKOVA Roza Temer'janovna, doctor of technical sciences,
docent, professor of the Department of Food Engineering
*Ural State University of Economics**(620144, Russia, Yekaterinburg, 8 Marta Street/Narodnaya Volya, 62/45, e-mail: trt64@mail.ru)***ILIUKHIN Ruslan Vasilievich**, senior lecturer of the Department of Information Systems Security
Sankt-St. Petersburg State University of Telecommunications named after Prof. M.A.Bonch-Bruevich
(192232, Russia, St. Petersburg, Bolshevikov Avenue, 22 K. 1, e-mail: iruslan@sputniksattv.ru)

Abstract. The use of low-dose γ -radiation technology for biostimulation of wheat grain on the example of soft spring wheat of the Ekaterina variety zoned in the Urals shows the possibilities of further use of radiation-treated grain in flour milling. As a part of the research, an improvement in the technological qualities of flour obtained from irradiated grain was established as a result of strengthening gluten by increasing the mass fraction of crude gluten to 29.05% and increasing its quality to 68 units of IDC. An increase in the content of crude protein by 0.71%, crude fat by 0.19% and crude fiber by 0.15% was found. After irradiation with low doses of γ -radiation (11-15 Gy), there was a change in the structure of carbohydrates: a decrease in the mass fraction of starch by 1.38% and a corresponding increase in sugars and pentosans by 0.78% and 0.60%, affecting the structural and mechanical properties of the dough. An increase in the mass fraction of crude protein by 0.71% was revealed with an improvement in the ratio of essential amino acids to interchangeable amino acids from 1.00:1.32 in non-irradiated samples to 1.00:1.21 in irradiated samples, an increase in the amino acid score of

protein from $128.85 \pm 0.09\%$ to $134.67 \pm 0.06\%$ was noted. An increase in the proportion of essential amino acids and a corresponding increase in the amino acid score for all essential amino acids, including lysine and threonine, having an amino acid score of 95.81% and 82.11%, respectively, allows us to conclude that low doses of γ -radiation can be used to bioactivate grain and subsequently increase the biological value of wheat flour produced from irradiated soft spring wheat of the Ekaterina variety". Consistent continuation of research is required on the irradiation of wheat with different doses of γ -radiation, as well as on the assessment of the quality of bread from flour treated with radiation.

Keywords: bioactivation, low doses, γ -radiation, soft spring wheat of the variety "Ekaterina", Gy, technological qualities, amino acid score.

Для цитирования: Тимакова Р.Т. Синергетический эффект при обработке семян пшеницы низкими дозами γ -излучения / Р.Т. Тимакова, Р.В. Ильяхин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 1(65). – С. 83-89. – EDN: OZBNAL.

Введение. Развитие агропромышленного комплекса направлено на достижение продовольственной безопасности страны путем укрепления межхозяйственных связей сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий на основе принципа инновационной направленности в результате внедрения современных технологий выращивания и переработки сельскохозяйственного сырья и функционального принципа социальной ориентации выпускаемых продуктов питания [1].

Агроиндустриальные факторы, определяющие направленность в растениеводстве при выращивании зерновой продукции, включают в себя природно-климатические условия, федеральные фонды семян (согласно ст. 22 Закона «О семеноводстве»), земельный фонд, почвенные ресурсы (с учетом типа плодородных почв), принципы севооборота и агробιοтехнологии. Цифровизация зернового хозяйства в рамках цифрового модуля «Агрорешения» позволяет формировать данные по прогнозированию погоды, проведению работ по удобрению почвы, посадке или сбору урожая и др. [2, 3]. Аналитическая система «История поля» на основе искусственного интеллекта дает возможность дистанционного мониторинга для отслеживания и контроля изменений на сельскохозяйственных угодьях, вегетации и состояния растений, урожайности и климатических особенностей [4, 5]. Наряду с этим, агротехнологические решения направлены на повышение урожайности в результате селекционных достижений и посевных качеств семенного материала.

Качество зерна пшеницы во многом определяется проводимой предпосевной обработкой семян фунгицидами, агрохимикатами и регуляторами роста растений, которые стимулируют рост и развитие растений, повышают в определенной мере устойчивость к стрессовым условиям произрастания, положительно влияют на стекловидность семян и содержание в них белка и клейковины [6-8]. Установлено положительное влияние удобрений на повышение содержания сырого протеина, сырого жира и сырой клетчатки [9].

В тоже время повышению урожайности яровой пшеницы сопутствует улучшение природы на 2-20 г/л, повышение массы 1000 зерен – на 1,1-4,5 г, стекловидности – на 7-14%, увеличение содержания

крахмала – на 0,6-1,5%, однако на содержание фосфора и жира фунгициды и агрохимикаты не оказывают заметного влияния, но приводят к небольшому снижению белка в зерне – на 0,3-1,2% [10]. Стимулирующее воздействие хитозана в концентрации 0,01-0,02% определяется увеличением всхожести и ускорением роста злаковых растений, в т.ч. пшеницы [11]. Имеются данные о положительном воздействии ультрафиолетового средневолнового излучения на посевные качества семян яровой пшеницы и продуктивность растений [12], электромагнитным излучением для прорастания и увеличения всхожести семян пшеницы, лука-порея, хлопчатника, фасоли и чечевицы [13].

Одним из эффективных методов стимуляции посевных качеств зерновых культур является обработка ионизирующим излучением. Снижение полевой всхожести всего на 1% приводит к потере урожая яровых на 1,5-2,0%, озимых – на 1,0-1,5% [14]. Сельскохозяйственные культуры отличаются различной радиочувствительностью в зависимости от вида, сорта, генотипа, физического состояния и дозы излучения, что может привести от биоактивации ростовых и обменных процессов до ингибирования и губительного влияния на растение (семя). В тоже время при высокой степени зараженности семян озимой пшеницы патогенным комплексом грибов [15] и фитопатогенов на яровой пшенице [16], наряду с химическим препаратами фунгицидной направленности, эффективным способом инактивации микроорганизмов и вредителей является обработка излучением повышенными дозами. В настоящее время зерно для дезинсекции обрабатывается дозами от 150 до 500Гр [17, 18].

Предпосевное облучение семян зерновых культур способствует ускорению прорастания и развитию проростков, влияющие на повышение их урожайности [19], что определяет промышленную применимость при выращивании зерновых культур [20]. Так, при поглощенной дозе 2Гр увеличивается урожайность пшеницы и ячменя до 20,76%, при дозе γ -излучения 5-8Гр урожайность пшеницы увеличивается на 9-11%, при дозе 10-30Гр – урожайность ячменя на 13-20%, при дозе 5-10Гр урожайность ржи на 10-15%, отмечают [21,22]. Для зерен твердой пшеницы максимальное проявление эффекта гормезиса

установлено при облучении до 20Гр [23].

Исследованием влияния γ -излучения дозами 50 и 100Гр на семена мягкой карликовой пшеницы установлено его положительное воздействие на метаболическую и пролиферативную активность клеток мягкой пшеницы и повышение общего содержания белка и нуклеиновых кислот, отмечают [24]. Обработка сухого зерна соответствующими (5Гр-20Гр) дозами γ -излучения приводит к активизации физико-химических процессов и функциональной активности зерен в состоянии метаболического покоя [14, 20, 21, 25-27]

Происходит стимулирование прорастания зерна, что приводит к синтезу белков и нуклеиновых кислот [28].

Апробированная промышленная применимость низкодозового γ -излучения для стимуляции ростовых качеств зерна, установленная по результатам ранее проведенных исследований, расширяет возможности использования обработанного излучением зерна и в пищевой промышленности, что определяет необходимость исследования нутриентного состава важнейшей зерновой культуры – пшеницы и оценки пищевой ценности яровой пшеницы районированного на Урале сорта «Екатерина», обработанной разными дозами излучения. По нашему мнению, для широкого распространения биоактивированного излучением зерна в условиях нацеленности населения на здоровьесбережение в соответствии с принципами здорового сбалансированного питания требуется проведение комплексных исследований пшеницы, как одного из главных продуктов в рационе россиян – «до 98,7 кг на человека в год при рекомендуемой норме 96 кг» [29].

При этом исследованиями ВОЗ подтверждается, что облучение продуктов питания дозой до 10 кГр не влияет на их безопасность и питательную ценность [18].

Применение радиационных технологий в результате обработки ионизирующим излучением возможно только в условиях специализированных центров – операторов облучателя на основании требований действующих стандартов, регламентирующих процедурные процессы и контроль за их осуществлением, а также контроль облученной продукции. Важнейшим нормативным документом, определяющим *SOPs (Standart Operating Procedures)* для обеспечения безопасности пищевых продуктов, обработанных ионизирующим излучением, является ГОСТ ISO 14470-2014 «Радиационная обработка пищевых продуктов. Требования к разработке, валидации и повседневному контролю процесса облучения пищевых продуктов ионизирующим излучением» [30]. Пищевые продукты и сельскохозяйственное сырье, подлежащие облучению, должны быть помещены в упаковку, обеспечивающую эффективный барьер, препятствующий повторной контаминации после облучения. Требуется разделение зон для облученных и необлученных про-

дуктов по их местонахождению. В нашей стране размещение символа *Radura* на упаковке продукции не обязательно, однако должна быть приведена информация о том, что продукт облучён.

Актуальность проведенных авторами исследований определена тем, что установлено биоактивирующее воздействие низких доз γ -излучения (11-15Гр) на изменение технологических качеств, нутриентный состав и аминокислотный скор (АКС) белка зерна товарного сорта пшеницы «Екатерина» в экспериментальных условиях. Исследования отличаются своей практической направленностью для дальнейшего применения результатов в пищевой промышленности.

Методология. Цель исследования заключается в изучении влияния низких доз γ -излучения на технологические качества, химический состав и аминокислотный скор белков зерна пшеницы. Выбор пшеницы в качестве объекта исследования определен распространенностью пшеницы, известной по «по археологическим раскопкам в Али-Коши в иранском Хусистане, датируемых 6500 г. до н.э., а также в Анатолии в Турции, датируемых 5 500 г. до н.э.» [31]: в структуре полевых культур, например Западно-Сибирского региона, занимает более 73% [32] и широко используемая в пищевой промышленности как сырье при производстве макаронных изделий, муки, крупы и хлебобулочных изделий, в пивоваренной и спиртовой промышленности. Современные сорта, в частности яровой пшеницы, характеризуются высоким потенциалом продуктивности [33] и соотношением вкладов в повышение урожая за счет улучшения агротехнологий и совершенствования селекционных технологий от 50:50% до 30:70% [34].

Для исследования взят районированный в Свердловской области среднеранний сорт «Екатерина» с урожайностью выше стандарта (Горноуральская), отличающийся по массе 1000 зерен, продуктивности колоса и рядом других параметров, включая адаптивную способность и устойчивость к пыльной головне и поражению корневыми гнилями [35], и высокую экологическую пластичность [36], что очень важно для реализации генетического потенциала в производстве с учетом абиотических и биотических факторов, отмечает [37]. По данным ряда авторов [38], из среднеранних образцов сорт «Екатерина» отличается высокой засухоустойчивостью в фазу проростков и равным со стандартом значением депрессии урожайности в засушливый год.

Зерно мягкой яровой пшеницы «Екатерина» (код сорта – идентификатор ® 8756414, оригинатор – ФГБНУ «Уральский НИИСХ». Патент № 7618 от 17.12.2014 г.) рода *Triticum* вида *Astivum* разновидность *Lutescens* удлинённой формы, окрашенное, белёсо-темно-желтого цвета, окраска фенолом очень темная, бороздка узкая и неглубокая, масса 1000 семян – 39,5±1,6 г. Зерна пшеницы соответствуют требованиям ТР ТС 015/2011 «О безопасности зерна», ГОСТ 9353-2016 «Пшеница. Технические условия».

Для активации зерна мягкой яровой пшеницы «Екатерина» 2020 года урожая опытных групп была проведена обработка сухих зерен низкими дозами γ -излучения (11-15Гр), способными вызвать эффект гормеза, в ООО «РЦОТ «Эра» на установке РТУ-3000. Источник гамма-облучения – ^{60}Co , тип ГИК-А6 и М60К60. Процесс контроля обработки γ -излучением проводился в автоматическом режиме с использованием компьютерных технологий.

Все исследования технологического качества

и химического состава проводились по общеизвестным стандартизированным методикам согласно нормативной документации в пятикратной повторности.

Результаты. На первом этапе проводили исследования технологических качества зерен яровой пшеницы сорта «Екатерина» и химический состав зерен пшеницы контрольной группы (необработанные излучением) и опытной группы (обработанные дозами 11-15Гр) (табл. 1).

Таблица 1– Технологические качества и химический состав зерен пшеницы Екатерина ($p \leq 0,05$)

Показатель	Контрольная группа	Опытная группа
Массовая доля сырого протеина, %	14,30±0,11	15,01±0,08
Массовая доля сырой клейковины, %	28,13±0,08	29,05±0,08
Качество клейковины, ед. ИДК	66±4	68±5
Число падений, сек	219±15	221±15
Натура, г/л	807±14	807±13
Стекловидность, %	48,2±0,03	49,0±0,04
Массовая доля сырого жира, %	2,19±0,09	2,38±0,09
Массовая доля сырой клетчатки, %	1,94±0,05	2,09±0,06
Массовая доля сырой золы, %	1,27±0,03	1,29±0,03
Массовая доля крахмала, %	62,32±0,62	60,94±0,56
Массовая доля сахаров, %	2,62±0,05	3,40±0,05
Массовая доля пентозанов, %	3,94±0,10	4,54±0,11
Массовая доля влаги, %	11,42±0,08	10,35±0,08

По результатам исследований технологических качеств и физико-химических показателей контрольные и опытные образцы зерна мягкой яровой пшеницы «Екатерина» соответствует 3 классу мягкой пшеницы, относящейся к ценным сортам пшеницы согласно требованиям ГОСТ 9353-2016 «Пшеница. Технические условия». По технологическим качествам (натура) не установлено отличий между зерном контрольных и опытных образцов с увеличением на 0,8% стекловидности зерна и числа падений на 2 сек. Хлебопекарные свойства муки пшеницы связаны с содержанием белка, количеством и качеством клейковины. Сырая клейковина пшеницы «Екатерина» относится к классу "хорошая", отличая хорошими упругими свойствами. В опытных образцах произошло увеличение содержания сырой клейковины по сравнению с контрольными образцами на 0,92% до (29,05±0,082)% и соответствующим увеличением качеством клейковины на 2 ед. ИДК.

После обработки ионизирующим излучением происходит снижение массовой доли влаги на 1,07%. В опытных образцах пшеницы произошло увеличение массовой доли сухого вещества в основном в результате увеличения массовой доли сырого протеина на 0,71%. Полученные данные согласуются с рядом исследователей, которые отмечают, что повышение содержания белка в зерне зерновых культурах, обработанных излучением, наряду с повышением

урожайности происходит в результате интенсивности генной экспрессии и сохранения эволюционно закрепленного и характерного для данного вида типа метаболизма, направленного в зерне на белок, с усилением синтеза нуклеиновых кислот [14, 39, 40]. Отмечено изменение структуры пищевых нутриентов, относящихся к поли-, ди- и моносахарам, с уменьшением массовой доли крахмала на 1,38% и соответствующим увеличением сахаров и пентозанов – на 0,78% и 0,60%. Полученные результаты сопоставимы с выводами ряда авторов [18, 41-44] по исследованию влияния толерантных доз излучения, приводящим к незначительным изменениям в белках, жирах, сахарах.

На втором этапе исследуется аминокислотный скор незаменимых аминокислот. Происходит улучшение соотношения незаменимых аминокислот к заменимым аминокислотам: 1,00:1,32 до 1,00:1,21 и повышение АКС с 128,85±0,09134,67±0,06 (рис. 1).

Пшеница сорта «Екатерина» отличается сбалансированностью аминокислотного состава. Аминокислотный скор белка выше в опытных образцах зерна по сравнению с контрольными образцами на 5,82%. К лимитирующим аминокислотам относятся лизин и треонин с аминокислотным скором 91,93% и 77,45% в контрольных образцах, при этом установлено их увеличение в опытных образцах до 95,81% и 82,11% соответственно.

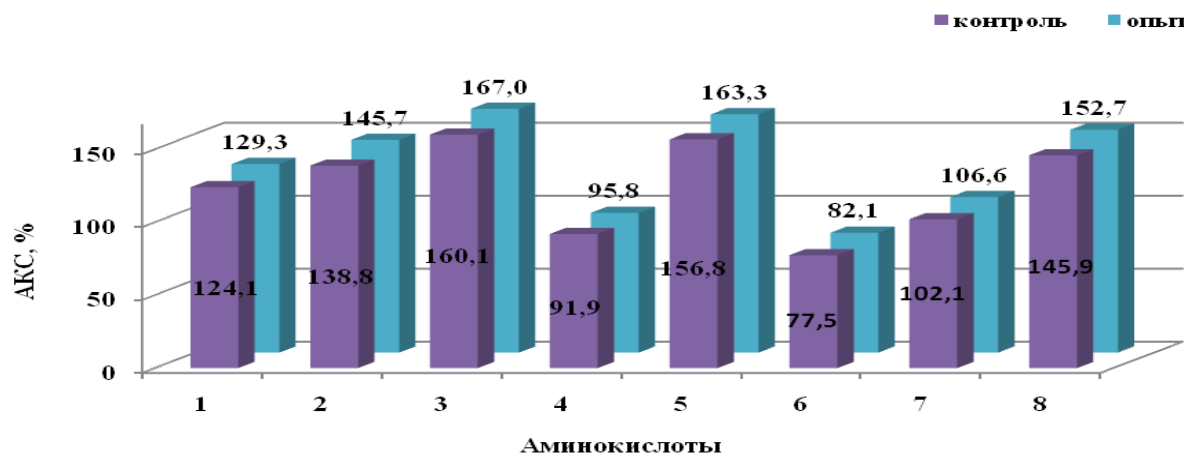


Рисунок 1 – Аминокислотный скор (АКС) белков зерен мягкой яровой пшеницы Екатерина, % ($p \leq 0,05$) (1 – валин, 2 – изолейцин, 3 – лейцин, 4 – лизин, 5 – метионин+цистин, 6 – треонин, 8 – триптофан, 9 – фенилаланин+тирозин)

Обсуждение. Сравнительная оценка данных экспериментальных исследований с результатами исследований других ученых показывает, что авторами проведены комплексные исследования технологических качеств, важных в дальнейшем для оценки хлебопекарных свойств муки из пшеницы определенного сорта – мягкой яровой пшеницы Екатерина, необработанной и обработанной низкими дозами гамма-излучения (11-15Гр), и биологической ценности белка пшеницы и соответствующего расчета аминокислотного сора (АКС). Установлено увеличение массовой доли сырой клейковины на 0,92% и качества клейковины на 2 ед ИДК. Стекловидность зерна увеличилась на 0,8%.

Полученные результаты по аминокислотному скору показывают, что содержание отдельных аминокислот (кроме лизина и треонина) выше, чем в «идеальном» белке, в опытных образцах – более высокие значения АКС по сравнению с контрольными образцами, что может быть обусловлено воздействием излучения.

Выводы. Применение низкодозового γ -излучения дозами 11-15Гр для биостимуляции зерна важнейшей зерновой культуры – пшеницы на примере мягкой яровой пшеницы районированного на Урале сорта «Екатерина», расширяет возможности использования обработанного излучением зерна при производстве муки и последующего применения в хлебопечении. В результате исследования установлено улучшение технологических качеств муки из зерна пшеницы «Екатерина» после облучения низкими дозами излучения с увеличением массовой доли сырой клейковины до 29,05% и ее качества до 68 ед. ИДК, увеличения числа падений на 2 сек за счет активизации фермента гликозил-гидролазы. Соответственно можно отметить укрепление клейковины, что влияет на улучшение качества теста.

В результате незначительного уменьшения массовой доли влаги на 1,07% отмечено увеличение содержания протеина на 0,71%, жира на 0,19% и клетчатки на 0,15%. После облучения произошло

изменение в структуре углеводов: уменьшение массовой доли крахмала на 1,38% и соответствующее увеличение содержания сахаров и пентозанов – на 0,78% и 0,60%, влияющие на структурно-механические свойства теста.

Происходит увеличение массовой доли сырого протеина на 0,71% с улучшением соотношения незаменимых аминокислот к заменимым аминокислотам с 1,00:1,32 в необлученных образцах до 1,00:1,21 в облученных образцах, выявлено повышение АКС с $(128,85 \pm 0,09)\%$ до $(134,67 \pm 0,06)\%$ соответственно. Незаменимые аминокислоты позволяют покрывать суточные потребности в них, что является положительным фактором, исходя из структуры суточного рациона питания среднестатистического россиянина и традиций питания в России с превышением рекомендуемой годовой нормы в 96 кг. Улучшение аминокислотного сора по всем незаменимым аминокислотам, включая лизин и треонин, показывает возможность применения низких доз излучения для повышения биологической ценности пшеничной муки, производимой из мягкой яровой пшеницы сорта «Екатерина». Полученные результаты подтверждаются повторяемостью полученных экспериментальных данных и сопоставимы с результатами других экспериментаторов. Необходимо продолжение исследований по облучению пшеницы разными дозами γ -излучения, а также по оценке качества хлеба из обработанной излучением муки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Абдуллаев И.С., Курбанов П.А., Алешко Р.А., Финогенова Ю.Ю. Совершенствование организационно-экономического механизма инновационного развития пищевой и перерабатывающей промышленности // Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. – 2023. – Т. 15. – № 3. – С. 357-386. DOI: 10.12731/2658-6649-2023-15-3-357-386.
2. Timakova R., Efremova S., Zuparova V. Ways to improve the technologic al properties of commercial grain and ensure its preservation // AIP Conference Proceedings: International conference on food science and biotechnology. 2021. 2419:020017 DOI: 10.1063/5.006915.
3. Тимакова Р. Т., Илюхин Р. В. Цифровые технологии:

новые подходы к прослеживаемости зерновых потоков в России // Цифровые модели и решения. – 2023. – Т. 2. – № 2. DOI: 10.29141/2782-4934-2023-2-2-6. EDN: KNGYQQ.

4. Грицько В.В. Опыт цифровизации на предприятиях АПК России // Актуальные вопросы современной экономики. – 2022. – № 11. – С. 1245-1250.

5. Иванова Д.Е., Сибилева А.А. Цифровизация как основной вектор инновационного развития АПК // Государственное и муниципальное управление. Ученые записки. – 2022. – № 4. – С. 309-313. DOI: 10.22394/2079-1690-2022-1-4-309-313

6. Виноградова В.С., Мартынцева А.А., Казарин С.Н. Влияние гуминовых и микроудобрений на урожайность яровой пшеницы // Земледелие. – 2015. – № 1. – С. 32-34.

7. Пашкова Г.И., Кузьминых А.Н. Влияние растворов молочной сыворотки и стимуляторов роста на урожайность и качество зерна яровой пшеницы // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2016. – № 2. – С. 9-14.

8. Кшникаткина А.Н., Русяев И.Г. Урожайность и качество зерна яровой пшеницы в зависимости от предпосевной обработки семян комплексными микроудобрениями и бактериальными препаратами // Агрохимический вестник. – 2018. – № 3. – С. 48-50.

9. Постников П.А., Попова В.В., Тиханская Е.Л. Урожайность яровой пшеницы в севооборотах и биохимический состав зерна // Вестник КрасГАУ. – 2022. – № 5. – С. 9-16. DOI: 10.36718/1819-4036-2022-5-9-16

10. Разина А.А., Бояркин Е.В., Дятлова О.Г. Урожайность и качество семян яровой пшеницы в зависимости от предпосевной подготовки семян // Вестник КрасГАУ. – 2022. – № 9(186). – С. 67-73. DOI: 10.36718/1819-4036-2022-9-67-73.

11. Арефьева О.А., Олышанская Л.Н., Абдуллин В.Ф. Определение стимулирующего воздействия хитозана на проростки основных сельскохозяйственных культур // Промышленные процессы и технологии. – 2022. – Т. 2. – № 1. – С. 6-14. DOI: 10.37816/2713-0789-2022-2-1-6-14.

12. Сурнина Е.Н., Буренина А.А., Астафурова Т.П., Михайлова С.И., Соснин Э.А., Пак Т.С., Панарин В.А., Нужных С.А. Влияние субдоз ультрафиолетового средневолнового излучения на продуктивность яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) // Химия энергий. – 2023. – Т. 57. – № 4. – С. 267-270. DOI: 10.31857/S0023119323030142.

13. Мамедова С.А., Ахмедова В.Э., Гулиева С.К., Ахундова Э.М. Стимуляция прорастания семян электромагнитным излучением // Актуальные исследования. – 2023. – № 2-1 (132). – С. 22-25.

14. Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности // Под общ. ред. Г.В. Козьмина, С.А. Гераськина и Н.И. Санжаровой Обнинск: ВНИИРАЭ, 2015. – 400 с.

15. Кинчарова М.Н., Кинчаров А.И., Абдраев М.Р. Распространенность грибковой инфекции на семенах озимой пшеницы в условиях Среднего Поволжья // Аграрный вестник Урала. – 2022. – № 12 (227). – С. 11-22. DOI: 10.32417/1997-4868-2022-227-12-11-22.

16. Кекало А.Ю., Заргарян Н.Ю., Немченко В.В. Распространение фитопатогенов на зерновых яровых культурах в Уральском регионе // Аграрный вестник Урала. – 2022. – № 11 (226). – С. 14-24. DOI: 10.32417/1997-4868-2022-226-11-14-24.

17. Чиж Т.В., Козьмин Г.В., Полякова Л.П., Мельникова Т.В. Радиационная обработка как технологический прием в целях повышения уровня продовольственной безопасности // Вестник Российской академии естественных наук. – 2011. – № 4. – С. 44-49.

18. Тимакова Р.Т. Научно-практические аспекты идентификации и обеспечения сохранности пищевой продукции, обработанной ионизирующим излучением: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.18.15. Екатеринбург, 2020. – 36 с.

19. Битаршвили С.В., Бондаренко В.С. Анализ транскрипционной активности генов метаболизма гиббереллинов после γ -облучения семян ячменя // В сб.: Радиация, технологии в сельск. хоз. и пищ. пром.: состояние и перспективы: сб. докл. междунар. научно-практ. конф. (26-28 сентября 2018г.). Обнинск: ФГБНУ ВНИИ радиологии и агроэкологии, 2018. – С. 46-48

20. Тимакова Р.Т., Ильяхин Р.В. Влияние малых

доз γ -излучения в условиях контролируемого микрофенологического онтогенеза ярового ячменя // Индустрия питания/ Food Industry. – 2023. – Т. 8. – № 1. – С. 14-25. DOI: 10.29141/2500-1922-2023-8-1-2.

21. Партеев К., Сатторов Б.Н., Муминов С.В. Влияние малых доз гамма-излучения цезия-137 на изменение генетических признаков пшеницы и ячменя // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2022. – № 1 (93). – С. 20-24.

22. Тимакова Р.Т., Ильяхин Р.В. К вопросу о радиостимуляции в предпосевной обработке зерна // Техническое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: сборник научных статей Междунар. науч.-практ. конф. (Минск, 24-25 ноября 2022 года). Минск: БГАТУ, 2022. – С. 418-421.

23. Melki M., Marouani A. Effects of gamma rays irradiation on seed germination and growth of hard wheat // Environ. Chem. Lett. – 2010. – Vol. – 8. P.307-310.

24. Минасбекян Л.А., Авагян И.А. Влияние ионизирующего излучения на радиочувствительность клеточных ядер проростков семян пшеницы // Биофизика. – 2023. – Т. 68. – № 3. – С. 554-563. DOI: 10.31857/S0006302923030171.

25. Веселова Т.В. Изменение состояния семян при их хранении, проращивании и под действием внешних факторов (ионизирующего излучения в малых дозах и других слабых воздействий), определяемое методом замедленной люминесценции: автореф. дис. ... докт. биол. наук. М., 2008. – 48 с.

26. Penfield S., King J. Towards a systems biology approach to understanding seed dormancy and germination // Proc. R. Soc. B. – 2009. – Vol. 276. – P. 3561-3569.

27. Пономаренко П.А., Безотосный С.С., Фролова М.А. Стимуляционный эффект при спецобработке семян сельскохозяйственных культур гамма-лучами // В сб.: Радиация, технологии в сельск. хоз. и пищ. пром.: состояние и перспективы: сб. докл. междунар. научно-практ. конф. (26-28 сентября 2018г.). Обнинск: ФГБНУ ВНИИ радиологии и агроэкологии, 2018. – С. 112-113.

28. Лутова Л.А., Ежова Т.А., Додуева И.Е., Осипова М.А. Генетика развития растений. СПб.: Наука, 2010. – 539 с.

29. Абумуслимова Е.А., Якунина М.А. Распределение основных продуктов питания и оценка приверженности населения к организации здорового питания // Современные проблемы гигиены, радиационной и экологической медицины. – 2022. – Т. 12. – С. 138-149.

30. Тимакова Р.Т. SOPs: формализованный подход к применению радиационных технологий. В сб.: Пища. Экология. Качество. Труды XVII междунар. научно-практ. конф. (Новосибирск, 18-19 ноября 2020 г.) Екатеринбург: УрГЭУ, 2020. – С. 638-641.

31. Гурбанова Г., Чарымов Ш., Розыева М., Метермэмедова Г. Основы выращивания пшеницы // A Posteriori. – 2022. – № 9. – С. 9-11

32. Юшкевич Л.В., Пахотина И.В., Щитов А.Г. Продуктивность и качество зерна яровой пшеницы в плодосменном севообороте лесостепи Западной Сибири // Зерновое хозяйство России. – 2021. – № 4(76). – С. 54-60. DOI: 10.31367/2079-8725-2021-76-4-54-60

33. Сапега В.А. Сортовое районирование яровой пшеницы и оценка ее сортов по урожайности и адаптивности в Тюменской области // Зерновое хозяйство России. – 2023. – Т. 15. – № 4. – С. 51-58. DOI: 10.31367/2079-8725-2023-87-4-51-58

34. Якушев В.П., Михайленко И.М., Драгавцев В.А. Агротехнологические и селекционные резервы повышения урожая зерновых культур в России // Сельскохозяйственная биология. – 2015. – Т. 50. – № 5. – С. 550-560. DOI: 10.15389/agrobiology.2015.5.550 rus.

35. Зезин Н.Н., Воробьев В.А., Воробьев А.В. Екатерина - новый сорт яровой пшеницы для адаптивно-ландшафтной системы земледелия Среднего Урала // Зерновое хозяйство России. – 2017. – № 49(1). – С. 62-66.

36. Терентьев С.Е., Романова И.Н., Князева С.М., Маленкова Л.В. Влияние биотических и абиотических условий выращивания на формирование высококачественного зерна новых сортов яровой пшеницы // Пищевая промышленность. – 2022. – № 9. – С. 22-25. DOI: 10.52653/PPI.2022.9.9.004.

37. Гончаренко А.А. Экологическая устойчивость сортов зерновых культур и задачи селекции // Зерновое хозяйство России. – 2016. – № 2(44). – С. 31-36.
38. Амунова О. С., Мамаева А. В. Поиск продуктивных, засухоустойчивых образцов мягкой яровой пшеницы для селекции в условиях Кировской области. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2023;24(4):538-548. DOI: 10.30766/2072-9081.2023.24.4.538-548.
39. Кузин А.М., Каушанский Д. А. Прикладная радиобиология. М.: Энергоиздат, 1981. – 221 с.
40. Гераськин С.А., Чурюкин Р.С., Казакова Е.А. Модификация развития ячменя на ранних этапах онтогенеза при воздействии γ -излучения на семена / Радиационная биология. Радиоэкология. – 2015. – Т. 55. – № 6. – С. 607. DOI: 10.7868/S0869803115060065.
41. Melki M., Marouani A. Effects of gamma rays irradiation on seed germination and growth of hard wheat // Environ. Chem. Lett. – 2010. – Vol. 8. – P.307-310.
42. Saxena S., Anjum F.M., Rahman S. Ionizing irradiation of grain: its principles and uses // Critical reviews in food science and nutrition. – 2011. – Т. 51. – № 2. – С. 157-165.
43. Безопасность и пищевая ценность облученной продукции: пер. с англ. – М.: Медицина, 1995. – 209 с.
44. Ionizing radiation for food safety and preservation. Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria, 2015. <https://doi.org/10.17306/j.afs.2015.3.19>.

Статья поступила в редакцию 10.12.2023

Статья принята к публикации 15.03.2024

УДК 664

EDN: OVTVWE

ВЛИЯНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОВОЩНЫХ КУЛЬТУР НА ПРОЦЕССЫ ХРАНЕНИЯ И ПЕРЕРАБОТКИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО СЫРЬЯ

©Автор(ы) 2024

SPIN: 2551-2375

AuthorID: 482628

ORCID: 0000-0002-9146-6951

ResearcherID: B-4318-2017

ScopusID: 57218252488

ШКОЛЬНИКОВА Марина Николаевна, доктор технических наук,
профессор кафедры Технологии питания

Уральский государственный экономический университет

(620144, Россия, Екатеринбург, ул. 8 Марта/Народной Воли, 62/45, e-mail: shkolkova.m.n@mail.ru)

SPIN: 2577-5850

AuthorID: 1027269

ORCID: 0000-0002-2009-8856

АББАЗОВА Венера Нагимовна, аспирант кафедры Технологии питания,
старший преподаватель кафедры управления качеством и экспертизы товаров и услуг

Уральский государственный экономический университет

(620144, Россия, Екатеринбург, ул. 8 Марта/Народной Воли, 62/45, e-mail: abbazova@usue.ru)

Аннотация. Потребление овощей, подверженных загрязнению при выращивании, хранении или обработке, все чаще становится причиной вспышек заболеваний пищевого происхождения. Цель настоящего исследования – категоризация критичности загрязнения сельскохозяйственного растительного сырья с анализом потенциально опасных факторов, возникающих в процессе его переработки (на примере плодов тыквы обыкновенной *Cucurbita pepo*). Объектом настоящего исследования явились научные публикации по идентификации симптомов поражения растений семейства тыквенных, вызванных различными возбудителями за более чем 15-ти летний период (с 2007 по 2022 годы) баз данных *Cyberleninka*, *Elibrary*, *ISI Web of Knowledge*. При работе с литературными данными использованы аналитические методы исследования: тематический поиск, систематизация, анализ, обобщение, прогноз. Систематизированы возбудители болезней *Cucurbita pepo* с определением уровня критичности заболевания. Проанализированы достоинства и недостатки химических и биологических методов предупреждения и борьбы с заболеваниями плодов *Cucurbita pepo*. Определены потенциально опасные факторы, возникающие в процессе переработки сельскохозяйственного растительного сырья.

Ключевые слова: безопасность продовольственного сырья, тыква, вредители, болезни овощных культур, загрязнение овощных культур.

INFLUENCE OF VEGETABLE CROPS CONTAMINATION ON THE PROCESSES OF STORAGE AND PROCESSING OF AGRICULTURAL RAW MATERIALS

© The Author(s) 2024

SHKOLNIKOVA Marina Nikolaevna, doctor of technical sciences, associate professor,
professor of the Nutrition Technology Department

ABBAZOVA Venera Nagimovna, senior lecturer of the department of quality management
and expertise of goods and services, postgraduate student of the department of Food Technology

Ural State University of Economics

(620144, Sverdlovsk Region, Yekaterinburg, 8 Marta/Narodnaya Volya st., 62/45,

e-mails: shkolkova.m.n@mail.ru, abbazova@usue.ru)

Abstract. Consumption of vegetables that are contaminated during cultivation, storage or processing is increasingly becoming a cause of foodborne illness outbreaks. The purpose of this study is to categorize the criticality of contamination of agricultural plant raw materials with the analysis of potentially hazardous factors arising during its processing (using the example of pumpkin fruits *Cucurbita pepo*). The object of this study was scientific publications on the identification of symptoms of damage to plants of the pumpkin family caused by various pathogens over a more than 15-year period (from 2007 to 2022) from the *Cyberleninka*, *Elibrary*, *ISI Web of Knowledge* databases. When working with literary data, analytical research methods were used: thematic search, systematization, analysis, generalization, forecast. The causative agents of *Cucurbita pepo* diseases have been systematized and the level of criticality of the disease has been determined. The advantages and disadvantages of chemical and biological methods for preventing and controlling diseases of *Cucurbita pepo* fruits are analyzed. Potentially hazardous factors arising during the processing of agricultural plant raw materials have been identified.

Keywords: safety of food raw materials, pumpkin, pests, diseases of vegetable crops, contamination of vegetable crops.

Для цитирования: Школьникова М.Н. Влияние загрязнения овощных культур на процессы хранения и переработки сельскохозяйственного сырья / М.Н. Школьникова, В.Н. Аббазова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 1(65). – С. 90-95. – EDN: OVTVWE.

Введение. Обеспечение безопасности продовольственного сырья и продуктов питания, состояние и качество питания населения являются факторами, имеющими важнейшее значение для сохранения и укрепления здоровья населения. Разработка и внедрение новых технологий в пищевой промышленности может стать причиной возникновения новых рисков, поэтому безопасность продовольственного сырья должна обеспечиваться на всех этапах жизненного цикла пищевой продукции, от выращивания сельскохозяйственных культур до хранения и реализации готовой продукции.

Одним из важнейших направлений государственной политики РФ является обеспечение продовольственной безопасности в стране. Организация и осуществление федерального государственного карантинного фитосанитарного контроля (надзора), включающее соблюдение обязательных требований в области карантина растений при производстве и переработке, ввозе или вывозе в РФ, хранении, перевозке, реализации, карантинном фитосанитарном обеззараживании и уничтожении подкарантинной продукции, подкарантинных объектов возложена на Федеральную службу по ветеринарному и фитосанитарному надзору (Россельхознадзор). По результатам деятельности в 2022 году Россельхознадзором проведены надзорные процедуры и выявлено 55 видов карантинных для Российской Федерации объектов. Растительное сырье, не соответствующее установленным требованиям, не были допущены к поставкам на территорию РФ [1].

Рассмотрим потенциальные риски загрязнения растительного сельскохозяйственного сырья на примере тыквы обыкновенной (*Cucurbita pepo*). Мякоть тыквы обыкновенной, выращиваемой в РФ практически повсеместно в широком диапазоне агроклиматических условий как сельхозпредприятиями, так и населением, обладает высоким технологическим потенциалом и является перспективной для использования в пищевых технологиях [2-5]. Плоды продовольственных культурных сортов тыквы обладают хорошей лежкостью и способностью к длительному хранению, однако, также могут служить причиной вспышек инфекционных заболеваний пищевого происхождения, так как выращиваются в естественной среде и поэтому растение уязвимо к загрязнению тяжелыми металлами и патогенами из различных источников – почва, орошение, воздух из окружающей среды, которые могут быть загрязненными, и обработка после сбора урожая.

Так, в 2022 году при проведении экспертизы импортных дынь из Узбекистана был обнаружен Карантинный вредный организм, ограниченно распространенный на территории Евразийского

экономического союза – Дынная муха (*Myiopardalis pardalina* (Bigot)), являющегося опасным вредителем, поражающим растения из семейства тыквенных (до 50% всего урожая) [1].

Большинство исследований, касающихся наличия болезнетворных агентов на фруктах и овощах, были сосредоточены исключительно на поверхности растений, без рассмотрения пульпы в качестве альтернативного источника инфекции.

Методология. Цель исследования – категоризация критичности загрязнения сельскохозяйственного растительного сырья с анализом потенциально опасных факторов, возникающих в процессе его переработки (на примере плодов тыквы обыкновенной *Cucurbita pepo*).

Задачи:

1. Систематизировать возбудителей болезней *Cucurbita pepo* с определением уровня критичности заболевания.

2. Проанализировать достоинства и недостатки химических и биологических методов предупреждения и борьбы с заболеваниями плодов *Cucurbita pepo*.

3. Определить потенциально опасные факторы, возникающих в процессе переработки сельскохозяйственного растительного сырья.

Объектом настоящего исследования явились научные публикации по идентификации симптомов поражения растений семейства тыквенных, вызванных различными возбудителями за более чем 15-ти летний период (с 2007 по 2022 годы) баз данных *Cyberleninka*, *Elibrary*, *ISI Web of Knowledge*.

При поиске использовались ключевые слова «безопасность продовольственного сырья», «бактериальное загрязнение тыквенных культур», «грибковые болезни тыквенных», «фитосанитарный контроль» и т.д. Ряд из отобранных статей был подробно проанализирован с точки зрения цели исследования.

При работе с литературными данными использованы аналитические методы исследования: тематический поиск, систематизация, анализ, обобщение, прогноз.

Результаты. По данным ФАО/ВОЗ микробное загрязнение свежих овощей при выращивании и/или во время обработки является распространенной проблемой во всем мире, и было установлено, что потребление таких овощей все чаще становится причиной вспышек заболеваний пищевого происхождения.

Вопросами изучения возникновения заболеваний овощей, а также микробного загрязнения свежих овощей занимаются как зарубежные, так и российские ученые. Несмотря на то, что у тыквы довольно крепкий иммунитет к инфекциям и

вредителям, болезни этой культуры провоцирует неправильная агротехника и неблагоприятные условия произрастания, что подтверждено рядом исследований.

Так, в работе Р.В. Гнутовой, В.Ф. Толкач, авторами идентифицирован вирус желтой мозаики фасоли, выявлены случаи заражения вирусом тыквенных овощных культур. Заражению подвержены только растения из семейств *Chenopodiaceae* и *Cucurbitaceae*. В настоящее время вирус не обнаружен на территории России [6].

В исследовании Е.Ю. Шнейдер, Н.В. Дреновой, Е.В. Каримовой рассмотрен карантинный для Российской Федерации бактериоз *Ralstonia solanacearum sensu lato*. Авторами определено, что большинство растений, поражаемых видами *Ralstonia solanacearum sensu lato*, относится к семейству пасленовых. Однако тыква обыкновенная (*Cucurbita pepo*) является культивируемым хозяином бактерии вида *R. Pseudosolanacearum* [7].

Исследование Е.В. Каримовой направлено на изучение бактериальной болезни тыквенных культур *Acidovorax avenae subsp. citrulli* (включена в Сигнальный перечень Европейской и Средиземноморской организации по карантину и защите растений) [8].

В исследовании авторов Толкач В.Ф., Какарека Н.Н., Волков Ю.Г., Козловская З.Н., Сапоцкий М.В., Плешакова Т.И., Дьяконов К.П., Щелканов М.Ю. представлен обзор фитовирусов, поражающих овощные и бахчевые сельскохозяйственные культуры, с указанием их экологических особенностей и распространенности на Дальнем Востоке. Результаты исследований используются для разработки комплекса диагностических тест-систем для выявления заболеваний овощных и бахчевых сельскохозяйственных культур [9].

По информации, опубликованной в национальном докладе о карантинном фитосанитарном состоянии территории Российской Федерации в 2019 и в 2020 гг., на территории страны отсутствуют многие

опасные вредные организмы, представляющие угрозу заражения овощных и бахчевых культур, впервые отмеченные в стране в качестве карантинных объектов, – африканская дынная муха (*Bactrocera cucurbitae* (Coquillett)), бактерии, вызывающие бактериальную пятнистость тыквенных культур (*Acidovorax citrulli* (Shaad et al.)) [1].

Справочники болезней, разработанные компаниями *Seminis & De Ruiter*, а также Агроэкологический атлас России и сопредельных стран (2008), содержат информацию о наиболее распространенных болезнях растений по всему миру. В практическом руководстве для семеноводов, овощеводов и консультантов по сельскому хозяйству представлено подробное описание болезни (название, причина, места распространения, симптомы и условия, необходимые для ее развития, а также меры по предотвращению) [10,11].

Используя информацию, полученную в ходе анализа литературных данных, можно выделить 4 группы возбудителей болезней тыквенных культур, в том числе плодов тыквы (табл. 1-3) [1, 6-11].

Анализируя данные, представленные в таблице 1, можно сделать выводы об уровне критичности заболеваний тыквы обыкновенной *Cucurbita pepo*, вызванных бактериальными возбудителями. Так, наиболее критичными заболеваниями являются бактериальная пятнистость плодов тыквенных и бактериальное увядание. Данные заболевания приводят к загниванию плодов.

Зачастую, все болезни тыквы обыкновенной *Cucurbita pepo*, вызванные вирусными возбудителями, имеют высокую степень критичности. При выявлении заболеваний данного характера, необходимо утилизировать пораженные овощи.

При оценке степени критичности болезней тыквы обыкновенной *cucurbita pepo*, вызванных грибковыми спорами, к наиболее опасным болезням, авторами отнесены плектоспориоз тыквенных, кладоспориоз и склеротиниоз, при обнаружении которых, необходимо утилизировать пораженные овощи.

Таблица 1 – Бактериальные возбудители болезней тыквы обыкновенной *Cucurbita pepo*

Возбудитель болезни, название болезни	Симптомы на плодах тыквы	Условия распространения
<i>Acidovorax citrulli</i> (синоним: <i>Acidovorax avenae subsp. citrulli</i>) Бактериальная пятнистость плодов тыквенных	мокнущие участки, трещины кожуры и гниение внутренних тканей плода	Бактерия распространяется с семенами. <i>Распространение</i> : ливневые дожди, сельскохозяйственное оборудование. <i>Условия окружающей среды</i> : высокая влажность. <i>Заражение плодов</i> : проникновение инфекции через устьица на ранних стадиях развития.
<i>Xanthomonas cucurbitae</i> Бактериальная пятнистость листьев тыквенных	форма, внешний вид и размер пораженных участков на плодах зависят от степени зрелости кожуры и содержания влаги	Бактерия распространяется с семенами. <i>Условия окружающей среды</i> : Температура до 30°C и высокая влажность.
<i>Erwinia tracheiphila</i> Бактериальное увядание	Симптомы на листьях тыквы: краевой хлороз и некроз.	<i>Распространение</i> : переносчики: листоеды <i>Diabrotica</i> и <i>Acalymma</i> .

Таблица 2 – Вирусные возбудители болезней тыквы обыкновенной *Cucurbita pepo*

Возбудитель болезни, название болезни	Симптомы на плодах тыквы	Условия распространения
Cucumber mosaic virus Вирус мозаики огурца	Симптомы на плодах тыквы: наличие некротических колец и полос коричневого цвета.	<i>Распространение:</i> тля-переносчик
Watermelon mosaic virus, Watermelon mosaic virus 1 Вирус мозаики арбуза	Плоды могут иметь мозаичную окраску, но в большинстве случаев она отсутствует. Вирус содержится в корнях больных растений.	<i>Распространение:</i> тля-переносчик вируса. относится к группе Potyvirus
Обыкновенная мозаика тыквы	Пораженные плоды теряют форму, на их поверхности появляются многочисленные вздутые участки округлой формы	<i>Распространение:</i> огуречные жуки <i>Diabrotica vittata</i> , <i>D. decempunctata</i> , <i>Coreus tristis</i>

Таблица 3 – Болезни тыквы обыкновенной *cucurbita pepo*, вызванные грибковыми спорами

Возбудитель болезни, название болезни	Симптомы на плодах тыквы	Условия распространения
<i>Fusarium solani</i> f. sp. <i>Cucurbitae</i> фузариозная гниль корневой шейки и корней	1: поражение корневой системы, стеблей и плодов. 2: поражение только плодов. Симптомы на плодах тыквы: образование твердой сухой гнили, участки имеют округлую форму.	Гриб <i>Fusarium solani</i> f. sp. <i>cucurbitae</i> может также поражать плоды, соприкасающиеся с зараженной почвой. <i>Условия окружающей среды:</i> влажность почвы и количество заразного начала
<i>Plectosporium tabacinum</i> (синоним: <i>Microdochium tabacinum</i>) Плектоспориоз тыквенных	Симптомы на плодах тыквы: образование небольших пятен, округлой формы от желтовато-коричневой до белой окраски.	<i>Распространение:</i> при орошении дождеванием, ветер. <i>Условия окружающей среды:</i> высокая влажность и температура до 32°C
<i>Cladosporium cucumerinum</i> Кладоспориоз	Симптомы на плодах тыквы: мокнущие пятна, налет оливково-черного цвета. По мере созревания плодов пятна превращаются в воронкообразные углубления.	<i>Распространение:</i> ветер, насекомые, сельскохозяйственная техника. <i>Условия окружающей среды:</i> температура до 24°C, повышенная влажность.
<i>Sclerotinia sclerotiorum</i> Белая гниль (склеротиниоз)	Симптомы на плодах тыквы: белый налет, плоды быстро размягчаются и становятся водянистыми.	<i>Условия окружающей среды:</i> высокая влажность
Альтернариоз черная пятнистость плодов, сухая пятнистость	Симптомы на плодах тыквы: коричневые и белые пятна, затем поверхность плодов может покрыть бархатистый налет черного цвета	<i>Нарушение технологии сбора и хранения овощей</i>

Отдельной группой возбудителей болезней тыквы обыкновенной *Cucurbita pepo* являются различные сельскохозяйственные вредители.

Из приведенных в таблицах 1-3 данных, видно, что подавляющее большинство болезней тыквы являются критичными, приводящими к утилизации плодов и, как следствие, полной утрате урожая. Данный факт подчеркивает важность как своевременной идентификации бактериальных и вирусных возбудителей, так и реализацию предупреждающих мероприятий возникновения заболеваний.

Методы борьбы с представленными в таблицах 1-3 возбудителями болезней плодов тыквы обыкновенной условно делятся на 2 типа: химические и биологические.

Результаты исследований отечественных и зарубежных ученых указывают на необходимость индивидуального подхода к изучению каждого вида возбудителя, в том числе вредителей.

Химический способ защиты растений подразумевает применение различных пестицидов и агрохимикатов.

Вопросы сокращения использования химического метода борьбы с возбудителями болезней и вредителями, с применением пестицидов и агрохимикатов, становятся актуальной темой для обсуждения во многих странах мира.

Биологический метод защиты сельскохозяйственных культур, как существующая альтернатива химическому, предполагает использование живых организмов и продуктов их жизнедеятельности для предотвращения или снижения потерь урожая (биологические средства защиты растений: энтомофаги).

Еще один эффективный биологический метод защиты растений в сельском хозяйстве – феромонные ловушки (содержат феромоны насекомых для привлечения особей своего вида, синтезированные в специальных лабораториях). Эффективность применения таких биологических средств защиты растений подтверждается научными исследованиями, проводимыми в полевых условиях, что позволяет в короткие сроки и на больших территориях эффективно выявлять очаги заражения насекомыми-вредителями, а также предотвращать их распространение [12].

Так, исследование Абдуллаевой Х.З., Рахмоновой Г.Р., проведенное в полевых условиях, с целью выявления и отлова дынной мухи в условиях открытого грунта, показало позволило повысить показатель урожайности [13].

Далее, целесообразно провести анализ опасных факторов на всех этапах производства и переработки овощного сырья (рис. 1).



Рисунок 1 – Потенциально опасные факторы, возникающие в процессе переработки плодов тыквы (составлено авторами)

Обсуждение. Безусловно, наиболее опасными факторами являются биологические и химические. Особая роль отводится входному контролю сырья, позволяющему отбирать более качественные плоды тыквы и снижать риски возникновения очагов заражения плодов тыквы при хранении в складских помещениях. На этапе первичной очистки овощного сырья происходит удаление частиц мусора, металлов, пестицидов, нитратов и прочих поверхностных загрязняющих веществ. Необходимо организовывать промежуточное хранение на различных этапах технологического процесса, в соответствии с рекомендуемыми условиями хранения для плодов и мякоти тыквы, а также соблюдать санитарные нормы пищевого перерабатывающего производства и придерживаться установленной технологии переработки сырья.

Снижение уровня микрофлоры на цельных плодах овощных культур зависит от типа продукта и степени первоначальной естественной обсемененности. Исследование Шилова Г.Ю. направлено на изучение современных методов дезинфекции сельскохозяйственной продукции. В работе определены сильные и слабые стороны методов дезинфекции сельскохозяйственной продукции, а также отмечены ограничения использования методов [14]. В исследовании Посокиной Н.Е., Захаровой А.И. рассмотрены основные термические способы обработки растительного сырья в промышленном производстве, определены перспективы развития и использования электрических методов нагрева. В настоящее время самыми распространенными методами остаются пастеризация и стерилизация [15].

Еще одним способом обработки сельскохозяйственной продукции и обеззараживания пищевых про-

дуктов является применение озонированной воды. Однако, в зависимости от условий обработки, озонированная вода может вызвать физико-химические изменения состава пищевых продуктов [16].

В настоящее время учеными разработана умная упаковка (*smart*-упаковка), увеличивающая срок хранения продуктов и сигнализирующая об их просрочке. В исследовании Андреева В.В. и Орловой О.Ю. представлены результаты использования упаковок из различных материалов, а также предложена концепция использования наклейки как *smart*-индикатора безопасности пищевой продукции [17].

Основными рекомендациями по предотвращению возникновения опасного фактора являются: проведение входного контроля плодов и мякоти (в том числе замороженной, разрезанной на сегменты) поступающей на переработку, а также термическая обработка и другие физические методы инактивации патогенной микрофлоры и использование первичной упаковки с антибактериальными свойствами.

Государственные стандарты нормируют основные показатели качества овощного сырья: внешний вид, внутреннее строение мякоти, спелость плодов. Размер плодов (по длине или по наибольшему поперечному диаметру) нормируется для всех тыквенных. Кроме того, для каждого вида овощей стандартом указаны допустимые пороки продукции, нормируемые в процентах, а также недопустимые пороки [18-20]:

- ТС 021/2011 – содержат правила оценки соответствия, нормативные показатели безопасности;
- ТС 022/2011 – содержат предписания о проверке маркировки продовольственных товаров;
- ГОСТ 7975-2013 Тыква продовольственная свежая. Технические условия. *Fresh food pumpkin. Specifications* – содержат требования, обеспечивающие

безопасность продукции для жизни и здоровья людей, к качеству и маркировке плодов тыквы продовольственной свежей культурных сортов видов *Cucurbita pepo* L., *Cucurbita moschata* Duch. и *Cucurbita maxima* Duch. и их гибридов, поставляемых и реализуемых для потребления в свежем виде и для промышленной переработки.

Кроме того, необходимо соблюдать условия и сроки хранения плодов и мякоти на перерабатывающих предприятиях, в том числе общественного питания и розничного ритейла. В период хранения овощи могут поражаться физиологическими или паразитарными болезнями. Так, например, несоблюдение требуемых значений показателей климатического режима (температура, относительная влажность воздуха) приводит к активизации составляющих патогенной микрофлоры, что отрицательно повлияет на микробиологическую безопасность мякоти и полученных полуфабрикатов. Перед закладкой плодов на хранение необходимо в обязательном порядке провести обработку и дезинфекцию хранилища. Необходимые условия для качественного хранения плодов тыквы (от 2 до 6 мес.): температура 10-13°C, относительная влажность воздуха 70-75%. Хранящиеся плоды подлежат регулярному осмотру на предмет обнаружения очагов заражения.

Выводы. Изучение наиболее вредоносных заболеваний тыквенных культур, в частности тыквы обыкновенной, при хранении и методы борьбы с ними являются актуальной темой для продолжения проведения исследований.

Почвенно-климатические условия, применение удобрений и средств защиты растений, технология сбора и организация хранения овощных культур оказывают влияние на биохимический состав тыквы, что позволяет в дальнейшем выбрать оптимальное сырье для производства продуктов питания.

Приоритетные направления для продолжения исследования: причины возникновения инфекционного фона, способствующего заражению плодов, а также анализ существующих методов хранения товарной тыквы для выявления путей совершенствования при проектировании, строительстве и оснащении современных овощехранилищ, влияние условий и продолжительности хранения на изменение потребительских свойств тыквы. Учитывая актуальность проблемы выбора наиболее безопасного метода дезинфекции свежих плодов тыквы, необходимо провести исследования по оценке эффективности использования таких методов и возможности их использования на пищевом перерабатывающем производстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Официальный сайт Федеральной службы по ветеринарному и фитосанитарному надзору (Россельхознадзор) / Режим доступа: <https://fsps.gov.ru>.
2. Школьникова М.Н. и др. Исследование химического состава мякоти тыквы как основы для безалкогольных напитков. Вестник МГТУ. – 2021. – Т. 24., – № 4. – С. 441-449.

. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2021-24-4-441-449>.

3. Kaur S., Panghal A., Garg M. K., Mann S. [et al.]. Functional and nutraceutical properties of pumpkin – a review // Nutrition & Food Science. – 2019. – Vol. 50. – Iss. 2. – P. 384-401. DOI: <https://doi.org/10.1108/nfs-05-2019-0143>.

4. Ling C., Rong L., Gangliang H., Hualiang H. Extraction and antioxidant activities in vivo of pumpkin polysaccharide // Industrial Crops and Products. 2020. – Vol. 146. Article number 112199. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112199>.

5. Голубкина Н.А., Химич Г.А., Антошкина М.С., Плотнокова У.Д., Надежкин С.М., Коротцева И.Б. Особенности каротиноидного состава тыквы Конфетка, перспективы использования. Овощи России. 2021;(1):111-116. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2021-1-111-116>.

6. Гнутова Р.В., Толкач В.Ф. Идентификация Дальневосточного изолята вируса желтой мозаики фасоли, обнаруженного на растениях тыквы // С.-х. биол., Сельскохозяйственная биология, Sel-hoz biol, Sel'skokhozyaistvennaya biologiya, Agricultural Biology. 2007. – №3.

7. Шнейдер, Е.Ю. Карантинные для Российской Федерации бактериозы видов *Ralstonia* / Е.Ю. Шнейдер, Н.В. Дренова, Е.В. Каримова // Фитосанитария. Карантин растений. – 2021. – № 3(7). – С. 10-26. – EDN GTSUXU.

8. Каримова, Е.В. Новое бактериальное заболевание тыквенных культур / Е.В. Каримова // Защита и карантин растений. – 2012. – № 6. – С. 35-36. – EDN OXWCCB.

9. Толкач В.Ф., Какарека Н.Н., Волков Ю.Г., Козловская З.Н., Сапоцкий М.В., Плешакова Т.И., Дьяконов К.П., Щелканов М.Ю. Вирусные болезни овощных и бахчевых сельскохозяйственных культур на юге Дальнего Востока. Юг России: экология, развитие. 2019;14(4):121-133. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2019-4-121-133>.

10. Афонин А.Н.; Грин С.Л.; Дзюбенко Н.И.; Фролов А.Н. (ред.) Агроэкологический атлас России и сопредельных стран: экономически значимые растения, их вредители, болезни и сорные растения. 2008 Режим доступа: <http://www.agroatlas.ru>.

11. Справочники болезней Seminis. Болезни тыквенных: полевое руководство. Справочник по болезням огурца, дыни, кабачка и тыквы. Часть 1 и Часть 2. Режим доступа: <https://www.vegetables.bayer.com/ru/ru-ru/resources/disease-guides.html>.

12. Джумакулов Т., Турдибаев Ж.Э., Мирзалиева Д.Б. Феромонная ловушка для карантинного вредителя *myiopardalina big* // ORIENSS. 2022. – №5-2.

13. Абдуллаева Х.З., Рахмонова Г.Р. Интегрированные методы защиты от дынной мухи и ее экологические особенности // Бюллетень науки и практики. – 2018. – №9.

14. Шилов Г.Ю. Современные методы дезинфекции салатных культур, овощей и фруктов // Пищевая промышленность. – 2013. – №8.

15. Посокина Н.Е., Захарова А.И. Термические способы обработки растительного сырья для увеличения его хранимоспособности // Вестник КрасГАУ. – 2022. – №11 (188).

16. Бурак Л.Ч. Использование технологии озонирования в пищевой промышленности // Sciences of Europe. – 2022. – №98.

17. Андреев В.В., Орлова О.Ю. Инновации в области логистики и упаковки в секторе foodtech // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. Том 3. Часть 1.

18. ТР ТС 021/2011 Технический регламент Таможенного союза "О безопасности пищевой продукции" (с изменениями на 25 ноября 2022 года) / Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/902320560>

19. ТР ТС 022/2011 Технический регламент Таможенного союза "Пищевая продукция в части ее маркировки" (с изменениями на 14 сентября 2018 года) / Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/902320347?section=text>

20. Тыква продовольственная свежая. Технические условия. Fresh food pumpkin. Specifications: межгосударственный стандарт// ГОСТ 7975-2013 / Дата введения 2015-01-01/ Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200107274>

Статья поступила в редакцию 06.02.2024

Статья принята к публикации 15.03.2024

УДК 637.52

EDN: PVQENE

ВЛИЯНИЯ МЕТОДОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ОРГАНОЛЕПТИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ МЯСА БАРАНИНЫ

© 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: 8280-5539

AuthorID: 1185412

ORCID: 0000-0002-0429-7476

СТЕПНЕВА Екатерина Витальевна, аспирант

Уральский государственный экономический университет
(620144, Екатеринбург, ул. 8 Марта, д. 62, e-mail: ekaterina.foxes@gmail.com)

SPIN: 8294-4236

AuthorID: 706445

ORCID: 0000-0002-2512-2587

КРЮКОВА Екатерина Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии питания Института менеджмента, предпринимательства и инжиниринга
Уральский государственный экономический университет
(620144, Екатеринбург, ул. 8 Марта, д. 62, e-mail: katepat@mail.ru)

SPIN: 9236-8303

AuthorID: 706228

ORCID: 0000-0002-8618-8301

КОКОРЕВА Лариса Анатольевна, кандидат технических наук,

доцент кафедры технологии питания Института менеджмента, предпринимательства и инжиниринга
Уральский государственный экономический университет
(620144, Екатеринбург, ул. 8 Марта, д. 62, e-mail: lariko77@mail.ru)

Аннотация. *Sous-vide* обработка является наиболее подходящим методом для мясного сырья с низким содержанием соединительной ткани и повышенным содержанием внутримышечного жира. Цель исследования – изучение влияния *sous-vide* технологии на потери массы и физико-химические показатели баранины (лопаточная часть) в сравнении с традиционным методом приготовления. Рассмотрены традиционный способ припускания и приготовление *sous-vide* в вакуум-пакете при двух разных температурах (60°C и 75°C). Потери массы определяли прямым методом путем измерения массы до и после тепловой обработки. Гидрофобность миофибриллярных белков определяли по величине поглощения света белковым экстрактом при длине волны 595 нм по количеству связанного бромфенолового синего. Массовую долю влаги и жира определяли методом из одной навески. Органолептическую оценку выполняли в соответствии с ГОСТ 9959–2015. Установлено, что баранина, приготовленная с использованием вакуумных пакетов и низкотемпературной варки (технология *sous-vide*), имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами тепловой обработки: повышенные органолептические характеристики и увеличенный выход готовой продукции за счет сокращения потерь в процессе приготовления. Гидрофобность миофибриллярных белков баранины *sous-vide* в вакуум-пакете при 60° и 75°C более высокая (18,6 и 18,1 мкг БФС), чем баранины, приготовленной традиционным способом (14,4 мкг БФС). В результате используемых видов тепловой обработки пищевая ценность увеличивается, причем в большей степени для выработанных по технологии *sous-vide* в вакуум-пакете при 60°C. Микробиологические показатели блюда «Баранина (лопатка) отварная» после 6 часов хранения при температуре 0–4 °C соответствуют требованиям ТР ТС 021/2011.

Ключевые слова: баранина, технология *sous-vide*, потери, гидрофобность миофибриллярных белков, вакуумирование, тепловая обработка.

EFFECTS OF HEAT TREATMENT METHODS ON ORGANOLEPTIC AND PHYSICO-CHEMICAL PARAMETERS OF MUTTON MEAT

© 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)

STEPNEVA Ekaterina Vitalevna, phd student

Ural State University of Economics
(620144, Yekaterinburg, ul. 8 Marta, 62, e-mail: ekaterina.foxes@gmail.com)

KRYUKOVA Ekaterina Vladimirovna, candidate of technical sciences, associate professor 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: katepat@mail.ru)

KOKOREVA Larisa Anatolevna, candidate of technical sciences, associate professor 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: lariko77@mail.ru)

Abstract. *Sous-vide* processing is the most suitable method for raw meat with a low content of connective tissue and an increased content of intramuscular fat. The aim of the study is to study the effect of *sous-vide* technology on weight loss and physico-chemical parameters of lamb (shoulder blade) in comparison with the traditional cooking method. The traditional method of priming and preparation of *sous-vide* in a vacuum bag at two different temperatures (60°C and 75°C) are considered. The mass loss was determined by the direct method by measuring the mass before and after heat treatment. The hydrophobicity of myofibrillary proteins was determined by the amount of light absorption by the protein extract at a wavelength of 595 nm by the amount of bound bromophenol blue. The mass fraction of moisture and fat was determined by the method of one sample. Organoleptic evaluation was performed in accordance with GOST 9959-2015. It has been established that mutton cooked using vacuum bags and low-temperature cooking (*sous-vide* technology) has several advantages over traditional methods of heat treatment: increased organoleptic characteristics and increased yield of finished products by reducing losses during cooking. The hydrophobicity of the myofibrillary proteins of lamb *sous-vide* in a vacuum bag at 60° and 75°C is higher (18.6 and 18.1 mcg BFS) than lamb cooked in the traditional way (14.4 mcg BFS). As a result of the types of heat treatment used, the nutritional value increases, and to a greater extent for *sous-vide* technology developed in a vacuum bag at 60° C. Microbiological parameters of the dish "Lamb (shoulder blade) boiled" after 6 hours of storage at a temperature of 0-4° C comply with the requirements of TR CU 021/2011.

Keywords: mutton, *sous-vide* technology, losses, hydrophobicity of myofibrillary proteins, vacuuming, heat treatment.

Для цитирования: Чугунова О.В. Влияния методов термической обработки на органолептические и физико-химические показатели мяса баранины / О.В. Чугунова, Е.В. Степнева, Е.В. Крюкова, Л.А. Кокорева // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 1(65). – С. 96-102. – EDN: PVQENE.

Введение. Современная тенденция развития рынка готовых к употреблению пищевых продуктов, основанных на технологии *sous-vide*, обладает несколькими преимуществами. Во-первых, использование вакуумной упаковки и низкотемпературной варки позволяет создавать безопасные продукты с точки зрения химии и биологии, что гарантирует высокое качество для потребителей.

Во-вторых, такие готовые к употреблению продукты являются удобными для потребителей, поскольку их можно быстро приготовить. Контролируемая температура в процессе приготовления помогает сохранить желаемые органолептические свойства продукта, включая аромат, цвет, вкус и консистенцию [1, 2].

Современные концепции безопасности пищевых продуктов включают проверку фактических значений различных показателей на соответствие допустимым интервалам и пороговым значениям, установленным в техническом регламенте Таможенного союза ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции». В то же время качество пищевой продукции, помимо гарантированного уровня безопасности

по нормируемой номенклатуре показателей, имеет значительный диапазон других характеристик [3].

Технология *sous-vide* является эффективным способом приготовления пищи, применяемым в ресторанной сфере. Её основная идея заключается в длительном нагреве пакетированной пищи в водяной бане при определенной температуре. Такой подход позволяет достичь оптимального сочетания мягкости и сочности продукта. Кроме того, технология обладает множеством преимуществ, таких как сохранение питательных веществ и придание мясу неповторимого аромата и вкуса. Правильная температура приготовления является ключевым фактором для достижения идеального результата. Поэтому важно выбирать температурный режим в соответствии с типом продукта и желаемой консистенцией [4, 5]. Более низкая предельная температура обработки внутренних слоев помогает сохранить высокое качество и консистенцию продукта. Исследования, направленные на изучение влияния низкотемпературной технологии приготовления на качество и безопасность, остаются актуальными.

При термической обработке мяса при

температурах до 100°C происходят незначительные потери питательных веществ, которые являются необходимыми для организма, так как не происходит разрушения витаминов, питательных веществ и свободных аминокислот. Однако могут происходить переходы минеральных веществ из продукта в сок, который остается в вакуумной упаковке до готовности. Это позволяет использовать сок для приготовления соуса к блюду, максимально использовав все компоненты продукта.

Полуфабрикаты рекомендуется доводить до окончательной готовности при температуре 85°C в пароконвектомате. Однако конкретный температурный режим и время нагревания должны определяться с учетом предпочтений потребителей.

Технология обработки *sous-vide* является наиболее оптимальным для приготовления мясного сырья с низким содержанием соединительной ткани и повышенным уровнем внутримышечного жира. Однако, анализ научно-технической литературы [11] указывает на ограниченное количество исследований, посвященных влиянию различных режимов тепловой обработки на баранину.

Цель исследования заключается в изучении влияния *sous-vide* технологии на потери массы и качественные показатели баранины (лопаточная часть) в сравнении с традиционным методом приготовления.

Основными характеристиками, которые рассматриваются в данной работе: физико-химические показатели, такие как потеря массы, содержание влаги, белка, жира, а также текстурные свойства мяса. Использование *sous-vide* технологии позволит оценить ее влияние на эти параметры и сравнить с результатами традиционного метода приготовления.

Методология. В данном исследовании были изучены образцы баранины лопаточной части для сравнения влияния различных методов приготовления на качество и пищевую ценность продукта. Рассмотрены варка основным способом и приготовление *sous-vide* в вакуум-пакете при двух разных температурах (60°C и 75°C) в течении 240–420 минут. В качестве контрольного образца использовалась баранина лопатка, приготовленная по рецептуре № 357 из сборника технических нормативов [6].

На начальном этапе порционные мясные полуфабрикаты, подготовленные в лабораторных условиях кафедры технологии питания УрГЭУ, были упакованы в термостойкие пакеты из полипропиленовой пленки. Далее, пакеты были вакуумированы и запаены с помощью аппарата вакуумной упаковки модели *DZ-300T*. Полуфабрикаты, находившиеся в вакуумных пакетах, подвергались низкотемпературной варке при разных температурах (60°C и 75°C) с использованием термостата модели *Pearl*, с устройством для контроля и поддержания температуры среды, а также с программой контроля достижения установленной температуры в продукте. Для прокола пакета и контроля температуры про-

дукта применяли стикеры из полиэтилентерефталата. Контроль температурного режима происходил с помощью термометра *ThermoPro TP-25*. Для упаковки использовались вакуумные пакеты, изготовленные из полипропиленовой многослойной пленки согласно ТУ 2245-001-55279928-2001.

Массовую потерю определяли непосредственно путем измерения массы до и после тепловой обработки. Расчет процента потерь осуществлялся путем вычисления отношения разницы измеренных масс к исходной массе.

Для определения гидрофобности миофибрилярных белков использовался метод [7], основанный на измерении поглощения света белковым экстрактом при длине волны 595 нм, через количество связанного бромфенолового синего (БФС), выраженное в микрограммах.

Содержание влаги в мясе и мясопродуктах, а также формы ее связи с составными частями, оказывают влияние на структурно-механические и другие характеристики продукта, а также на его выход. Для определения массовой доли влаги использовался анализатор влажности *MX-50/MF-50*. Проба образца (0,5 г) размещалась на электронных весах, которые взвешивали пробу до и после нагрева для определения потери влаги.

Массовую долю жира определяли рефрактометрическим методом. Метод основан на извлечении жира из измельченной навески (5г) с использованием малолетучего растворителя (например, монобромнафталина), за которым следует определение коэффициента преломления экстракта при помощи рефрактометра [8].

Органолептическую оценку проводили в соответствии с ГОСТ 9959-2015 с участием экспертов, обладающих специальными знаниями в области технологии мяса и мясных продуктов. Этот метод включает субъективную оценку продукта на основе его внешнего вида, цвета, запаха и вкуса, проводимую опытными специалистами.

Статистическая обработка данных проводилась стандартными методами математической статистики с доверительной вероятностью $p \leq 0,05$. Результаты измерений представлены в виде среднего значения $\pm$ стандартное отклонение.

Результаты. Использование *sous-vide* обработки для повышения качества мяса имеет несколько положительных эффектов. Во-первых, применение влажного нагрева при температурах ниже 1000 С, близких к точке денатурации мышечных белков помогает избежать негативных последствий нагрева для качества мяса.

Sous-vide способствует достижению высокой однородности консистенции продукта, что означает, что мясо будет равномерно прогрето и приобретет желаемую текстуру. Это также помогает снизить потери влаги, что может произойти при других методах приготовления.

Во вторых, использование вакуума и герме-

точной упаковки в су-вид обработке способствует стабилизации жировой фракции в мясе, что помогает сохранить его качество и предотвратить окисление жиров.

Потери массы в процентном соотношении определяли, как отношение массы куска мякоти до и после термической обработки образцов [10]. Органолептическую оценку качества готовой продукции проводили по ГОСТ 9959-2015. Полученные данные отражены в таблице 1.

В ходе проведения исследований было отмечено, что баранина, приготовленная с использованием вакуумных пакетов по технологии *sous-vide*, имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами тепловой обработки. Эти преимущества проявляются в повышенных органолептических характеристиках и увеличении массы готовой кулинарной продукции вследствие уменьшения потерь в процессе технологии приготовления (табл. 2).

Основываясь на исследованиях, проведенных в КемГУ (Кемерово) [11] и Университете Шихеци (Китай) [12] денатурационные изменения мышечных белков в зависимости от способа тепловой обработки оценивали по степени гидрофобности поверхности

миофибриллярных белков [11].

Степени гидрофобности поверхности миофибриллярных белков в зависимости от вида термической обработки представлено на рисунке 1.

На следующем этапе изучено влияние технологии *sous-vide* на изменение содержания влаги, белка и жира (табл. 3). В таблице представлены данные для образцов, приготовленных по технологии варка основным способом и *sous-vide* при температурах 60°C и 75°C в течение 360 минут.

На заключительном этапе проводились исследования в отношении микробиологической безопасности мясных изделий. Согласно техническим регламентам ТР ТС 021/2011 и ТР ТС 034/2013, установлены стандартные значения микробиологических показателей безопасности пищевых продуктов.

Для оценки микробиологических показателей были проведены исследования мяса, приготовленного традиционным способом варки, а также с использованием инновационной технологии *sous-vide* при разных температурах – 60°C и 75°C.

Результаты этих исследований, а так же после 6 часов хранения при температуре 0-4°C представлены в таблице 4.

Таблица 1 – Органолептические показатели блюда «Баранина (лопатка) отварная» в зависимости от технологии приготовления

Технология приготовления	Варка основным способом	Варка основным способом в вакуумном пакете	Приготовление по технологии <i>sous-vide</i> при 60°C	Приготовление по технологии <i>sous-vide</i> при 75°C
Внешний вид	кусочки правильной формы			
Вкус	свойственный отварному мясу, умеренно соленый, слегка сухой	свойственный отварному мясу, умеренно соленый, сочный	свойственный отварному мясу, умеренно соленый, очень сочный	свойственный отварному мясу, умеренно соленый, сочный
Цвет	коричневый	светло-коричневый		
Консистенция	мягкая, сухая	мягкая, нежная	мягкая, нежная, сочная	мягкая, нежная, сочная
Запах	свойственный баранине			

Таблица 2 – Потери при тепловой обработке в зависимости от технологии приготовления

Технология приготовления	Потери при тепловой обработке, %
Варка основным способом	38-42
Варка основным способом в вакуумном пакете	31-35
Приготовление по технологии <i>sous-vide</i> при 60°C	29-31
Приготовление по технологии <i>sous-vide</i> при 75°C	30-32

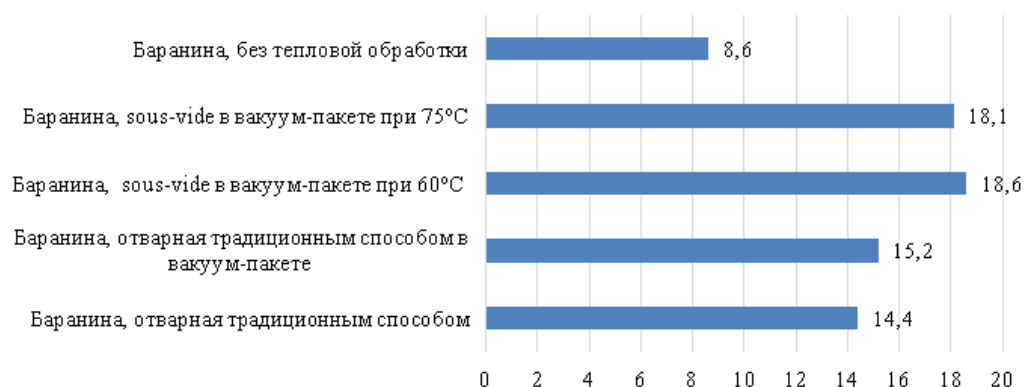


Рисунок 1 – Гидрофобность миофибриллярных белков в зависимости от вида термической обработки, мкг БФС

Таблица 3 – Физико-химические показатели блюда «Баранина (лопатка) отварная» в зависимости от технологии приготовления

Технология приготовления	Массовая доля влаги, %	Массовая доля жира, %	Массовая доля белка, %
Варка основным способом	63,9±0,2	4,9±0,1	15,8±0,1
Варка основным способом в вакуумном пакете	66,8±0,2	5,9±0,1	16,9±0,2
Приготовление по технологии sous-vide при 60 °С	74,9±0,1	6,1±0,1	17,8±0,1
Приготовление по технологии sous-vide при 75 °С	73,1±0,2	6,4±0,1	17,2±0,1

Таблица 4 – Микробиологические показатели блюда «Баранина (лопатка) отварная» в зависимости от технологии приготовления

Микробиологический показатель	Норматив ТР ТС 021/2011	Варка основным способом	Варка основным способом вакуумном пакете	Приготовление по технологии sous- vide при 60 °C	Приготовление по технологии sous- vide при 75 °C
КМАФАнМ, КОЕ/г, не более	1 × 10 ³	349	442	758	633
БГКП, не допускаются в массе продукта (г)	1,0	не обнаружены			
S. aureus, не допускаются в массе продукции (г)	1,0	не обнаружены			
Бактерии рода Proteus, не допускаются в массе продукции (г)	0,1	не обнаружены			
после 6 часов хранения при температуре 0-4 °C					
КМАФАнМ, КОЕ/г, не более	1 × 10 ³	1615	536	761	615
БГКП, не допускаются в массе продукции (г)	1,0	не обнаружены			
S. aureus, не допускаются в массе продукции (г)	1,0	не обнаружены			
Бактерии рода Proteus, не допускаются в массе продукции (г)	0,1	не обнаружены			

Обсуждение. Проведенные лабораторные исследования показали, что все опытные образцы соответствуют нормативной документации и могут быть рекомендованы для реализации как самостоятельное блюдо, так и являться готовым полуфабрикатом высокой степени готовности.

Результаты исследования, согласуются с данными проведенные Kathuria, D. и его соавторами [9], что с *sous-vide* обработка улучшает активность естественных ферментов, которые отвечают за мягкость мяса. Одним из механизмов достижения этого является увеличение растворимости коллагена.

Плавное изменение цвета в образцах, приготовленных с помощью технологии низкотемпературной варки обусловлено щадящим температурным режимом, длительностью тепловой обработки как таковой и параметрами тепловой обработки полуфабриката [11].

Баранина, приготовленная по методу *sous-vide*, обладает более ярким вкусом, ароматом и сохраняет свою сочность. Это объясняется тем, что вакуумная упаковка способствует задержке утечки влаги и ароматических соединений из продукта, что позволяет сохранить его качества и вкусовые характеристики.

Кроме того, использование низкой температуры приготовления позволяет минимизировать потери питательных веществ и сократить время приготовления. Это в свою очередь приводит к увеличению выхода готовой продукции, так как меньше пищевых

веществ теряется в процессе обработки.

Таким образом, технология *sous-vide* демонстрирует значительные преимущества в приготовлении баранины по сравнению с традиционными методами термической обработки, обеспечивая более высокие органолептические характеристики и повышенный выход готового продукта. Все это делает эту технологию привлекательной для производства и потребления баранины.

Миофибриллярные белки включают сократительные белки миозин, актин и актомиозин, а также регуляторные белки тропомиозин, тропонин и альфа-и бета-актины [11].

Благодаря своей сложной структуре, коллаген оказывает определенное воздействие на величину потерь и органолептические показатели баранины. Под воздействием высоких температур происходит денатурация нативного коллагена, что влечет за собой существенные изменения в структуре и текстуре мяса.

Как следует из полученных данных, гидрофобность миофибриллярных белков баранины *sous-vide* в вакуум-пакете при 60° и 75°С более высокая (18,6 и 18,1 мкг бромфенолового синего), чем баранины, приготовленной традиционным способом (14,4 мкг бромфенолового синего). Это объясняется тем, что, когда коллаген вступает в контакт с водой, содержащейся в мясе, и подвергается нагреву, это приводит к значительным изменениям [11].

Денатурация коллагеновых волокон происходит

поэтапно. Сначала происходит набухание волокон, затем они сокращаются и приобретают стекловидную форму. Этот процесс обратим, и волокна могут восстановить свою первоначальную структуру при охлаждении. Однако, при продолжительном воздействии тепла происходит разрушение коллагеновых волокон до отдельных полипептидных цепочек. Это явление приводит к потере свойств коллагена и его функциональности [12, 13]. Поэтому важно контролировать температурные условия при обработке коллагеновых материалов, чтобы сохранить их целостность и качество. Глютин – это растворимый коллоидный белок, образующийся в результате гидролиза коллагена при его нагревании. Коллаген – это основной белок соединительной ткани животных, включая мясо. В процессе нагревания волокна коллагена начинают размягчаться и превращаться в глютин. Этот процесс имеет важное значение при приготовлении мяса, так как глютин является натуральным стабилизатором влаги, придающим более сочную и мягкую структуру мясу [13, 14]. Однако, при повышении температуры до 60°C и выше, коллаген может перейти в глютин слишком быстро, что может привести к потере влаги и сухости мяса. Поэтому важно контролировать температуру при приготовлении, чтобы добиться оптимального размягчения мяса, сохранения влаги и достижения желаемой консистенции блюда [15, 17].

Таким образом, длительный высокотемпературный нагрев может вызвать денатурацию коллагена и повлиять на потери влаги и консистенцию мяса [18, 19]. Однако использование *sous-vide* обработки при умеренных температурах позволяет избежать таких негативных последствий и достичь желаемых характеристик продукта.

Обработка продуктов при высокой температуре вызывает растворение жиров и вытекание его из клеток. Это происходит из-за повреждения структуры коллагена – компонента клеточной оболочки. Чем дольше продукт подвергается нагреванию, тем больше жира теряется. Кроме того, обработка приводит к потере влаги, что увеличивает долю сухого вещества в блюде. Таким образом, различные методы тепловой обработки оказывают влияние на пищевую ценность продуктов, особенно технология *sous-vide* при температуре 60°C [12, 20].

В результате проведенных исследований было установлено, что предложенная технология приготовления блюд из мяса с использованием низкотемпературной варки соответствует микробиологическим стандартам безопасности. Важно, однако, учесть, что прямой контакт продукта с теплопередающей средой может привести к снижению концентрации некоторых химических веществ, таких как КМАФАнМ.

Выводы. Подводя итог, можно утверждать, что использование технологии *sous-vide* при соблюдении определенного температурного режима обработки мяса в течение заданного периода времени позволяет

поддерживать высокое качество блюд с точки зрения органолептических характеристик.

Выявлено, что минимальные изменения степени гидрофобности поверхности миофибриллярных белков в зависимости от вида термической обработки наблюдается у баранины *sous-vide* в вакуум-пакете при 60°C. Полученные данные коррелируют с изменением массовой доли влаги в готовом продукте и потерями при тепловой обработке (29-31%).

Экспериментально установлен оптимальный режим *sous-vide* обработки баранины, заключающийся в прогреве продукта при 60°C в течении 360 минут. При соблюдении разработанных и научно обоснованных режимов производства, продукты, приготовленные методом *sous-vide*, могут быть сохранены в течение более длительного времени, чем при использовании других методов. Это связано с предотвращением повторной контаминации микроорганизмами после обработки благодаря герметичной упаковке, что способствует обеспечению микробиологической безопасности продуктов. Это также способствует увеличению срока годности продукта благодаря вакуумной упаковке и снижению потерь при термической обработке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Малышева, Е.С. Оценка качественных характеристик баранины/ Е.С. Малышева, Н.М. Бессонова// Вестник АГАУ. – 2016. – №4 (138). – С. 124-127.
2. Намсараева, З.М. Влияние способов тепловой обработки на цветные характеристики мяса/ З.М. Намсараева, И.В. Хамаганова, Т.Ц. Дамдинова // Вестник ВГУИТ. – 2021. – №2 (88). – С. 164-168.
3. Рождественская, Л.Н. Перспективы нутриентного профилирования для профилактики заболеваний и укрепления здоровья / Л.Н. Рождественская, С.П. Романенко, О.В. Чугунова // Индустрия питания. – 2023. – Т. 8. – № 2. – С. 63-72. – DOI 10.29141/2500-1922-2023-8-2-7. – EDN LHQLXH.
4. Натиров А.К. Улучшение качественных характеристик мясных продуктов из баранины/ А.К. Натиров, Б.К. Болаев, О.Н. Кониева, Г.В. Федотова // Ползуновский вестник. – 2022. – №4. – С. 106-113.
5. Пермин. А.П. Применение технологии *sous-vide* в изготовлении полуфабрикатов из говядины / А.П. Пермин. // Пища. Экология. Качество. Труды XIII международной научно-практической конференции. Ответственные за выпуск: О.К. Мотовилов, Н.И. Пыжикова и др., 2016. – С. 35-38.
6. Сборник технологических нормативов. Сборник рецептов блюд и кулинарных изделий для предприятий общественного питания [Текст] / Под ред. Ф.Л. Марчука. – М.: Хлебпроинформ, 1996. – 620 с.
7. Chell, I., Gatellier, P., Santé-Lhoutellier, V. (2006). Technical note: A simplified procedure for myofibril hydrophobicity determination. Meat Science, 74(4), 681-683. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2006.05.019>.
8. Антипова, Л.В. Методы исследования мяса и мясных продуктов/ Л.В. Антипова, И.А. Глотова, И.А. Рогов. Москва: Колос, 2001.
9. Kathuria, D., Dhiman, A. K., Attri, S. (2022). Sous vide, a culinary technique for improving quality of food products: A review. Trends in Food Science and Technology, 119, 57-68. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.11.031>.
10. Степнева, Е.В. Оценка показателей качества и безопасности кулинарной продукции, полученной по технологии *sous vide* / Е.В. Степнева, Н.А. Панкратьева, О.В. Чугунова [и др.] // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. – 2022. – № 4. – С. 113-121. – DOI 10.24412/2311-6447-2022-4-113-121.

11. Гуринович Г.В. Исследование влияния способов тепловой обработки на физико-химические свойства говядины в зависимости от технологии созревания. / Л.В. Антипова, И.А. Глотова, И.А. Рогов // Пищевые системы, 5(4), 2022. – С. 376-382. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2022-5-4-376-382>.
12. Фофанова, Т.С. Технология су-вид – некоторые аспекты качества и микробиологической безопасности / Т.С. Фофанова // Теория и практика переработки мяса. – 2018. – Т. 3. – № 1. – С. 59-68. – DOI 10.21323/2414-438X-2018-3-1-59-68. – EDN YUDWZJ.
13. Васюкова, А.Т. Технология продукции общественного питания: учебник для бакалавров / А.Т. Васюкова, А.А. Славянский, Д.А. Куликов. – Москва: Дашков и К, 2016. – 496 с. – ISBN 978-5-394-02516-7.
14. Лей У, Дэн Х, Чжан З, Го Х, Чжан Ж. Влияние окисления на физико-химические свойства и деградацию миофибриллярных белков баранины. J Food Sci. 2022 июль; 87 (7): 2932-2942. doi: 10.1111 / 1750-3841.16166. Epub 2022 31 мая. PMID: 35638344.
15. Lepetit, J. (2008). Collagen contribution to meat toughness: Theoretical aspects. Meat Science, 80(4), 960-967. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2008.06.016>.
16. Hoeche U. (2016). The Sous Vide Revolution: Coming Full Circle and Beyond. Dublin Gastronomy Symposium. Food and Revolution, P. 109-114.
17. Wang, S.H., Chang M.J., Chen T.C. (2004). Shelf-life and microbiological profiler of chicken wing products following sous vide treatment. International Journal of Poultry Science, 3 (5), P. 326-332.
18. Roldan M., Antequera T., Martin A., Mayoral A.I., Ruiz J. (2013). Effect of different temperature–time combinations on physicochemical, microbiological, textural and structural features of sous-vide cooked lamb loins. Meat Science, 93, P. 572-578.
19. Чугунова, О.В. Эффективное использование продовольственных ресурсов в технологии пищевых систем / О.В. Чугунова, А.В. Арисов. – Курск: Закрытое акционерное общество «Университетская книга», 2022. – 189 с. – ISBN 978-5-907555-46-4. – EDN WLXGBN.
20. Application of sous vide cooking to aquatic food products: a review / Z. Cui, N. Zhang, W. Lou, T. Manoli // Ciencia e Tecnologia de Alimentos. – 2022. – Vol. 42. – P. e108021. – DOI 10.1590/fst.108021. – EDN NHVVIK.

Статья поступила в редакцию 13.02.2024

Статья принята к публикации 15.03.2024

УДК 613.292

EDN: XJBIMW

**ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ БЕЛКА И АМИНОКИСЛОТНОГО СОСТАВА СУБПРОДУКТОВ
СВИНЕЙ ПОРОДЫ «КРУПНАЯ БЕЛАЯ»**

© Автор(ы) 2024

SPIN: 3419-6879

AuthorID: 1081753

ORCID: 0000-0001-7879-6625

РАЗУМОВСКАЯ Елена Сергеевна, кандидат ветеринарных наук*Орган по сертификации продукции и услуг КГБУ Управление ветеринарии по г. Барнаулу
(656031, Алтайский край, г. Барнаул, ул. Шевченко, 158., e-mail: elenabar83@inbox.ru)*

SPIN: 8227-2844

AuthorID: 542534

ORCID: 0000-0002-3536-562X

ResearcherID: L-2204-2016

ScopusID: 57041280000

МИЛЕНТЬЕВА Ирина Сергеевна, доктор технических наук, доцент,

заведующая кафедрой бионанотехнологии

*Кемеровский государственный университет**(650056, г. Кемерово, б-р Строителей, 47, e-mail: irazumnikova@mail.ru)*

SPIN: 9255-4650

AuthorID: 393631

ORCID: 0000-0002-0309-5709

ResearcherID: L-2502-2016

ScopusID: 36028520300

НЕВЕРОВА Ольга Александровна, доктор биологических наук,

заведующий кафедрой экологии и природопользования

*Кемеровский государственный университет**(650000, Россия, Кемерово, Красная 6, e-mails: nev11@yandex.ru)*

Аннотация. Гипертония является наиболее распространенным хроническим заболеванием, встречающимся во всем мире. В связи с постоянным увеличением численности населения, страдающими болезнями сердца, перед учеными остро стоит задача по профилактике данного заболевания. Поиск сырья для выделения биоактивных пептидов из свиных субпродуктов, вызван растущим интересом к разработке функциональных продуктов питания с антигипертензивным действием. Так же, повышение эффективности использования побочного сырья мясоперерабатывающей отрасли в полном объеме, является основным принципом безотходного производства белка. Содержание белка в пробах исследуемых свиных желудках находится на высоком уровне (равно $17,16 \pm 1,12\%$). Целью работы явилось изучение аминокислотного состава субпродуктов, на примере свиных желудков с использованием метода высокоэффективной жидкостной хроматографии. Полученные результаты оценивались на возможность дальнейшего использования исследуемого сырья, в качестве источника биологически-активных пептидов, обладающих функциональными гипотензивными свойствами. Качественный состав исследуемых субпродуктов представлен 20 аминокислотами. Процент заменимых аминокислот выше, чем незаменимых. Наибольшее часть аминокислот представлена незаменимой пролином, содержание которой составило $43,829 \pm 4,4$. Таким образом, полученные результаты указывают на биологическую ценность исследуемых свиных субпродуктов, связанную с достаточно высоким содержанием в ней белка и аминокислот.

Ключевые слова: свиные желудки, белок, заменимые аминокислоты, незаменимые аминокислоты, метод высокоэффективной жидкостной хроматографии, гипертония, функциональные продукты, пептиды.

**ASSESSMENT OF PROTEIN CONTENT AND AMINO ACID COMPOSITION
OF OFFAL OF PIGS OF THE "LARGE WHITE" BREED**

© The Author(s) 2024

RAZUMOVSKAYA Elena Sergeevna, candidate of veterinary sciences*The certification body for products and services of the KGB Department of Veterinary Medicine in Barnaul
(656031, Altai Territory, Barnaul, ul. Shevchenko, 158., e-mail: elenabar83@inbox.ru)***MILENTYIEVA Irina Sergeevna**, doctor of technical sciences, associate professor,

head of the Department of Bionanotechnology

*Kemerovo State University**(47 Stroiteley b-r, Kemerovo, 650056, e-mail: irazumnikova@mail.ru)***NEVEROVA Olga Alexandrovna**, doctor of biological sciences,

head of the Department of Ecology and Nature Management

Kemerovo State University

(650000, Russia, Kemerovo, Krasnaya 6, e-mail: nev11@yandex.ru)

Abstract. Hypertension is the most common chronic disease found worldwide. Due to the constant increase in the population suffering from heart disease, scientists are faced with an urgent task of preventing this disease. The search for raw materials for the isolation of bioactive peptides from pork by-products is driven by growing interest in the development of functional foods with antihypertensive effects. Also, increasing the efficiency of using by-products of the meat processing industry in full is the basic principle of waste-free protein production. The protein content in the samples of the studied pork stomachs is at a high level (equal to $17,16 \pm 1,12\%$). The purpose of the work was to study the amino acid composition of offal, using the example of pork stomachs using the method of high-performance liquid chromatography. The results obtained were assessed for the possibility of further use of the studied raw materials as a source of biologically active peptides with functional antihypertensive properties. The qualitative composition of the studied by-products is represented by 20 amino acids. The percentage of nonessential amino acids is higher than essential ones. The largest portion of amino acids is represented by essential proline, the content of which was $43,829 \pm 4,4$. Thus, the results obtained indicate the biological value of the studied pork by-products, which is associated with a fairly high content of protein and amino acids.

Keywords: pork stomachs, protein, interchangeable amino acids, essential amino acids, high-performance liquid chromatography method, hypertension, functional products, peptides.

Для цитирования: Разумовская Е.С. Оценка содержания белка и аминокислотного состава субпродуктов свиней породы «Крупная белая» / Е.С. Разумовская, И.С. Милентьева, О.А. Неверова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 1(65). – С. 103-107. – EDN: XJBIMW.

Введение. Мясо и продукты убоя сельскохозяйственных животных относятся к наиболее ценным продуктам питания, биологическая ценность которых, определяется высоким содержанием белка [1-3].

Известно, что качество мясного сырья зависит в первую очередь от вида, породы, возраста, условий кормления и содержания животных. В настоящее время, в целях обеспечения населения полноценным белком, существенную роль играет развитие отрасли свиноводства [4-6].

Важным условием производства свинины является создание прочной кормовой базы, содержащей достаточное количество питательных веществ [7].

Питательные вещества, прежде чем попасть в клетки организма, должны быть подвергнуты ферментному гидролизу в пищеварительном тракте, при этом сложные соединения, такие как белки, распадаются на более простые аминокислоты [8].

Незаменимые и заменимые аминокислоты являются ценнейшими функциональными веществами, играющие огромную роль во всех жизненных процессах организма [9].

Для обеспечения населения достаточным количеством полноценного белка, перед учеными всего мира остро стоит проблема поиска новых видов источников сырья.

Одним из путей решения данной задачи является глубокая переработка побочных продуктов при убойе свиней.

Несмотря на высокую пищевую ценность, использование некоторых субпродуктов ограничено, так как они утратили свое пищевое назначение, однако нашли свое применение в биотехнологии функциональных продуктов.

На сегодняшний день, из органов сельскохозяйственных животных, выделено большое количество биологически активных веществ, на основе

которых созданы препараты, широко используемые в терапии заболеваний органов пищеварения, регуляции иммунитета и гомеостаза [10-11].

В последние годы, гипертония стала проблемой общественности, являясь основным фактором риска развития сердечно-сосудистых заболеваний [12].

Современные методы лечения и профилактики повышенного кровяного давления препаратами синтетического происхождения, приводят к ряду побочных реакций организма, таких как кашель, кожная сыпь и другое [13].

Актуальные исследования в области применения белков пищевого происхождения, сосредоточены на изучении их влияния на физиологические функции организма, в том числе гипотензивную.

Так же известно, что профилактика высокого артериального давления, снижает вероятность развития рисков с летальным исходом.

Рядом авторов установлено, что аминокислотная последовательность белка влияет на спектр его биологической активности [14].

Аминокислоты в организме обладают широким спектром действия, благодаря им протекают адаптационные, иммунные и защитные реакции от микроорганизмов, токсических веществ и др. [15-17].

Доказано, что аминокислотная последовательность белка *Pro-Ser-Ser-Pro-Pro-Ser, Asp-Ala-Tyr-Pro-Ser-Gly-Ala-Trp*, в состав которого входит заменимая аминокислота пролин, проявляет выраженную гипотензивную активность [18-19].

Так же имеются литературные данные, о способности взаимодействия пролина с таким природным антикоагулянтом, как гепарин, тем самым снижая повышенный уровень холестерина и сахара в крови, предотвращая сердечные заболевания, инсульты, атеросклероз [20].

На основании вышеизложенного можно сделать

вывод о том, что изучение побочного сырья животного происхождения, как ценного источника аминокислот, на сегодняшний день является актуальным.

Целью работы явилось изучение содержания белка и аминокислотного состава субпродуктов, на примере свиных желудков с использованием метода высокоэффективной жидкостной хроматографии. Полученные результаты оценивались на возможность дальнейшего использования исследуемого сырья, в качестве источника биологически-активных пептидов, обладающих функциональными гипотензивными свойствами.

Методология. В рамках исследования были отобраны свиночки породы «крупная белая» в возрасте 6-7 месяцев, живая масса которых составляла 100-120 кг, в количестве 9 голов. В состав рациона кормления животных (из расчета на 1000 кг) были включены следующие виды добавок: пшеница (330,0 кг), ячмень (462,0 кг), горох (80,0 кг), соевый шрот (2,0 кг), соя полножирная (80,0 кг), мел (10,0 кг), монокальций (5,0 кг), соль (3,0 кг), лизин (3,0 кг), рыбная мука (15,0 кг), премикс (10,0 кг). Суточная норма корма составила около 3,0 кг на голову. Убойный выход массы туши составил 70-73,0 кг.

Выращивание, откорм и дальнейший убой проводился на территории убойного пункта АО «Антипинское» Алтайского края, Тогуйского района. При разделке туш извлекали желудки. Слизистая оболочка с подслизистой тканью отделялись от мускульной части органа для дальнейшего измельчения и производства пепсина. Далее, обработанные однокаммерные свиные желудки исследовались в лаборатории биотестирования природных нутрицевтиков

НИУФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет».

Массовую долю белка исследовали согласно МВИ массовой доли общего и белкового азота в мясе, мясных продуктах, белкосодержащих пищевых продуктах методом сжигания по методу Дюма с помощью автоматического анализатора азота *Rapid N cube (Elementar Analysensysteme)*. Аминокислотный состав определяли по ГОСТ Р 55569-2013, а также методом обращённо-фазовой ВЭЖХ с использованием хроматографа жидкостного *Shimadzu LC-20 Prominence* с диодно-матричным детектором *Shimadzu SPD20MA*, колонка *Kromasil C-18 250x4,6 мм*. [21-22]. Условия проведения исследования: 752 мм. рт.ст., 24°C, влажность 40%.

Для получения достоверных результатов исследований, опыты осуществляли в 3-х кратной повторности.

Результаты исследований обработаны методом вариационной статистики с учетом контроля по Стьюденту при $p \leq 0,05$.

Результаты. В процессе исследования установлено, что среднее процентное содержание белка, содержащегося в свиных желудках равно $17,16 \pm 1,12\%$.

Данный показатель находится на высоком уровне, что доказывает биологическую ценность продукта. Наши данные согласуются с исследованиями других авторов [23].

Анализ аминокислотного состава был проведен методом высокоэффективной жидкостной хроматографии. Как показывают данные (рис. 1), искомые аминокислоты обнаружены в разных количествах.

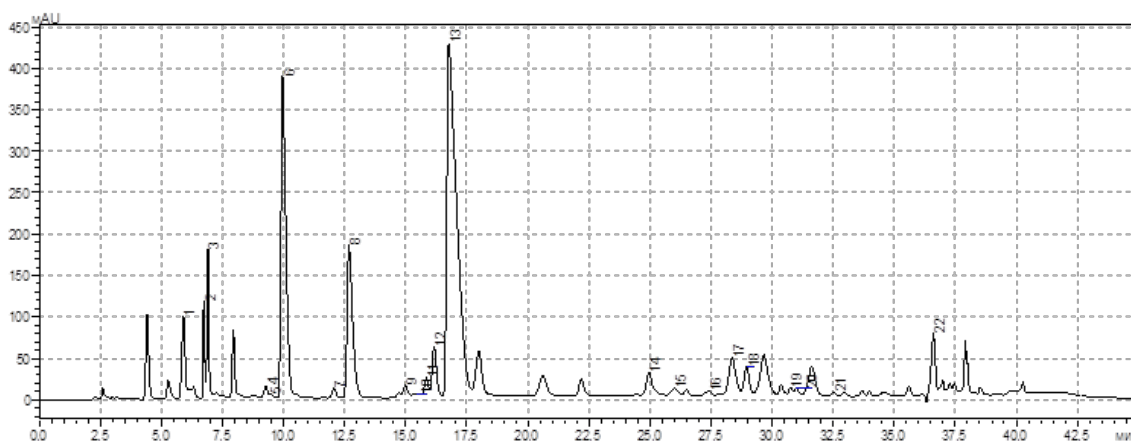


Рисунок 1 – ВЭЖХ хроматограмма анализа состава основных аминокислот свиных желудков:

(ось X – время элюции (мин), ось Y – интенсивность сигнала (mAU))

Пик 1,2 – Асп, пик 3,4 – Глу, пик 5 – о-Про, пик 6 – Сер, пик 7 – Гли, пик 8 – Гис, пик 9 – Арг, пик 10 – Трп, пик 11 – Тре, пик 12 – Ала, пик 13 – Про, пик 14 – Тир, пик 15 – Мет, пик 16 – Вал, пик 17 – Цис, пик 18 – Цис, пик 19 – Иле, пик 20 – Лей, пик 21 – Фен, пик 22 – Лиз

При обработке хроматограммы отмечаем, что общее время разделения всех аминокислот на хроматографе составило 42,5 минуты. Всего получилось идентифицировать 20 аминокислот. Из них наибольшим количественным выходом обладает

аминокислота, такая как пролин.

Результаты исследования количественного состава основных аминокислот свиных желудков представлены в таблице 1. Исходя из полученных данных выявлено, что аминокислотный профиль

свиных желудков, представлен как незаменимыми, так и заменимыми аминокислотами.

Процент заменимых аминокислот выше, чем незаменимых. Наибольшее часть аминокислот представлена незаменимой пролином, содержание

которой составило $43,8 \pm 4,4\%$. Из отдельных аминокислот так же преобладают: серин ($19,65 \pm 2,4\%$), гистидин ($10,96 \pm 2,3\%$), аспарагин + аспарагиновая кислота ($3,139 \pm 2,3\%$), глутамин + глутаминовая кислота ($5,431 \pm 1,1\%$).

Таблица 1 – Компонентный состав основных аминокислот по данным ВЭЖХ

Наименование образца	Определяемый параметр	Ед. изм.	Результат испытаний
Свиные желудки	Аспарагин + аспарагиновая кислота в сумме (Asp, Asn)	%	$3,139 \pm 2,3$
	Глутамин+глутаминовая кислота в сумме (Glu, Gln)	%	$5,431 \pm 1,1$
	L-Пролин	%	$0,680 \pm 0,12^*$
	Серин (Ser)	%	$19,659 \pm 2,4$
	Глицин (Gly)	%	$0,482 \pm 0,12^*$
	Гистидин (His)	%	$10,961 \pm 2,3$
	Аргинин (Arg)	%	$0,408 \pm 1,1$
	Триптофан	%	$0,092 \pm 0,12^*$
	Треонин (Thr)	%	$0,908 \pm 1,2$
	Аланин (Ala)	%	$2,727 \pm 1,2$
	Пролин (Pro)	%	$43,829 \pm 4,4$
	Тирозин (Tyr)	%	$1,849 \pm 1,2$
	Метионин (Met)	%	$0,497 \pm 1,1$
	Валин (Val)	%	$0,388 \pm 0,2^*$
	Цистин (Cys-Cys)	%	$3,225 \pm 1,4$
	Цистеин (Cys)	%	$1,758 \pm 1,1$
	Изолейцин (Ile)	%	$0,257 \pm 0,2^*$
	Лейцин (Leu)	%	$0,259 \pm 1,1$
	Фенилаланин (Phe)	%	$0,169 \pm 0,12^*$
	Лизин (Lys)	%	$3,281 \pm 1,3$

Примечание: * $p \leq 0,05$

Обсуждение. Методом ВЭЖХ получены данные по белковому и аминокислотному профилю субпродуктов свиных, на примере желудков [24, 25]. Несмотря на то, что некоторые аминокислоты носят название заменимые, их значимость необыкновенно велика. Здоровый организм способен сам синтезировать заменимые аминокислоты из пищи, богатой белками, однако людям, страдающим от проблем со здоровьем, рекомендовано получать аминокислоты дополнительно. Известно, что для укрепления стенок артерии, нормализации кровяного давления, предупреждения тромбообразования и снижения риска атеросклероза, в рационе увеличивают количество пролина [26].

Следует отметить, что желудки, полученная в результате убоя свиней мясо-сальной породы «крупная-белая», характеризуются как сбалансированное по аминокислотному составу сырьё, используемое в дальнейшем для получения белковых гидролизатов для пищевого применения.

Выводы. Использование побочных продуктов свиноводства, позволит решить не только вопрос с безотходным производством, а также проблемы с расширением ассортимента продуктов функциональной направленности с гипотензивным действием. Таким образом, полученные результаты указывают на биологическую ценность исследуемых свиных субпродуктов, связанную с достаточно высоким содержанием в них белка и аминокислот.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Инструментальные методы анализа в области прикладной биотехнологии» на базе КемГУ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Муратов А.В., Мадумаров А.К. Биологические аспекты повышения мясной продуктивности сельскохозяйственных животных // Территория науки. – 2017. – № 6. – С. 63-68.
2. Siegrist M, Hartmann C. Why alternative proteins will not disrupt the meat industry // Meat Sci. – 2023. – № 203. – P. 1-6.
3. Arihara K, Yokoyama I, Ohata M. Bioactivities generated from meat proteins by enzymatic hydrolysis and the Maillard reaction // Meat Sci. 2021. – Vol. 180. – P. 108561.
4. Юнусова О.Ю., Сычёва Л.В., Мальчиков Р.В. Влияние витаминно-минеральной добавки на переваримость и использование питательных веществ рациона молодняка свиней на откорме // Животноводство и кормопроизводство. – 2017. – № 1 (97). – С. 107-112.
5. Montegiove N, Pellegrino RM, Emiliani C, Pellegrino A, Leonardi L. An Alternative Approach to Evaluate the Quality of Protein-Based Raw Materials for Dry Pet Food // Animals (Basel). – 2021. – № 11(2):458. P. 1-18.
6. Roth K., Pröll-Cornelissen M.J., Heu E.M., Dauben C.M., Henne H., Appel A.K., Schellander K., Tholen E., Groe-Brinkhaus C. Genetic parameters of immune traits for Landrace and Large White pig breeds // J Anim Breed Genet. 2022. № 139(6):695-709. – P. 695-709.
7. Татаркина Н.И. Использование питательных веществ рационов ремонтным молодняком крупной белой породы свиней // Вестник Курганской ГСХА. – 2019. – № 2 (30). – С. 55-57.
8. Бояринцев В.В., Евсеев М.А. Метаболизм и нутритивная поддержка хирургического пациента: Руководство для врачей. СПб.: Онли-Пресс, 2017. – 260 с.
9. Сапожникова А.И. Биоактивный кератин как функ-

циональная серосодержащая кормовая добавка / А.И. Сапожникова, К.В. Есепенок // Международный научно-исследовательский журнал. – 2020. – № 11 (101). – С. 144-149.

10. Разумовская Е.С. Влияние процесса консервации на гистохимические показатели специального сыра. Хранение и переработка сельхозсырья. 2022;(4).

11. Лебедева С.Н., Улзытуева Д.А. "Рациональная переработка побочного мясного сырья для создания природного иммуномодулирующего средства" Все о мясе, №. 1, 2016. – С. 20-24.

12. García-Tejedor, A., Sánchez-Rivera, L., Castelló-Ruiz, M., Recio, I., Salom, J. B., & Manzanares, P. Новые антигипертензивные пептиды на основе лактоферрина, продуцируемые *Kluyveromyces marxianus*: профиль стабильности в желудочно-кишечном тракте и ингибирование ангиотензинпревращающего фермента (АПФ) *in vivo* // Журнал сельскохозяйственной и пищевой химии. 2014. № 62(7). – С. 1609-1616.

13. Браво Ф.И., Кальво Е., Лопес-Вильяльба Р.А., Торрес-Фуэнтес С., Мугерза Б., Гарсия-Руис А., Моралес Д. Повышение эффективности побочных продуктов скотобойни цыплят для получения антигипертензивных пептидов. Питательные вещества. 15 января 2023;15 (2):457.

14. Колесникова А.А., Толстенок И.В., Флейшман М.Ю. Биологические эффекты пролинсодержащих олигопептидов // Дальневосточный медицинский журнал. – 2021. – №. 4. – С. 92-99.

15. Кудряшева А.А., Преснякова О.П. Медико-биологические особенности натуральных пищевых аминокислот // Пищевая промышленность. – 2014. – № 3. – С. 68-73.

16. Тихонов С.Л., Кольберг Н.А., Тихонова Н.В., Лазарев В.А. Влияние пептидов животного происхождения на общую клеточность костного мозга и миелограмму иммунодефицитных мышей // Балтийский морской форум: материалы X Международного Балтийского морского форума. – 2022. – Т. 4. – С. 165-173.

17. Кручинин А.Г., Агаркова Е.Ю. Биологически активные пептиды молока: обзор // Пищевая промышленность. – 2020. – № 12. – С. 92-96.

18. Ворошилин Р.А., Просеков А.Ю., Махамбетов Э.М. Биоактивные пептиды из вторичных сырьевых ресурсов сырья животного происхождения // Аграрная наука в условиях модернизации и цифрового развития АПК России: Сборник статей по материалам Международной научно-практической конференции, 2022. – С. 93-96.

19. Разумникова, И.С., Козлова, О.В., Дороганова, А.В., Аветисян, Г.А. Перспективный подход к созданию продуктов специального назначения для профилактики гипертонической болезни и хронической сердечной недостаточности // Техника и технология пищевых производств. – 2010. – № 1 (16). – С. 39-43.

20. Ляпина Л.А., Оберган Т.Ю., Григорьева М.Е., Майстренко Е.С. Противосвертывающие эффекты комплексного соединения пролина с гепарином. Вестник Московского университета. Серия 16. Биология. 2013;(2):3-6.

21. ГОСТ Р 55569-2013 Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Определение протеиногенных аминокислот методом капиллярного электрофореза. – М.: Стандартинформ, 2014. – 18 с.

22. Руденко А.О., Карцова Л.А., Снарский С.И. Определение важнейших аминокислот в сложных объектах биологического происхождения методом обращенно-фазовой ВЭЖХ с получением фенилтиогидантоинов аминокислот // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2010. – Т. 10. – С. 223-230.

23. Ходорева О.Г., Марченко К.А., Гордынец С.А. Субпродукты свиные: аминокислотный состав и сбалансированность белка // Пищевая промышленность: наука и технологии. – 2022. – № 15 (3). – С. 79-85.

24. Симонян Е.В., Шикова Ю.В., Хисамова А.А. Валидация методики определения количественного содержания некоторых аминокислот в лекарственных формах методом ВЭЖХ // Медицинский вестник Башкортостана. – 2016. – №. 5 (65). – С. 99-102.

25. Babich O.O., Milentyeva I.S., Dyshlyuk L.S., Ostapova E.V., Altshuler O.G. Structure and properties of antimicrobial peptides produced by antagonist microorganisms isolated from siberian natural objects // FOODS AND RAW MATERIALS. – 2022.

– Vol. 10 (1). – P. 27-39.

26. Что нам даёт пролин [Электронный ресурс] – URL: <https://elamed.com/vse-o-lechenii/chto-nam-dayet-prolin/> (дата обращения: 08.12.2023).

Статья поступила в редакцию 18.01.2024

Статья принята к публикации 15.03.2024

УДК 614.8.084

EDN: OORISP

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СРЕДЫ В ПОКАЗАТЕЛИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО РИСКА НА ПРЕДПРИЯТИЯХ

© Автор(ы) 2024

SPIN: 4305-2071

Author ID: 967593

ORCID: 0000-0003-3771-6590

Researcher ID: AKK-7102-2021

Scopus ID: 57200275629

БОРИСОВА Анастасия Викторовна, кандидат технических наук,

доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности»

Ростовский государственный университет путей сообщения

(344038, Россия, Ростов-на-Дону, площадь Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, дом 2,

e-mail: nastja004@bk.ru)

SPIN: 7772-2802

Author ID: 1095601

ORCID: 0000-0003-2727-7221

БАЛАНОВА Марина Васильевна, кандидат технических наук,

доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности»

Ростовский государственный университет путей сообщения

(344038, Россия, Ростов-на-Дону, площадь Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, дом 2,

e-mail: fmv04@mail.ru)

SPIN: 3202-2790

Author ID: 1108039

ORCID: 0000-0002-9386-905X

Researcher ID: AAK-9232-2021

КОЗЛЮК Виталий Викторович, кандидат технических наук,

доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности»

Ростовский государственный университет путей сообщения

(344038, Россия, Ростов-на-Дону, площадь Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, дом 2,

e-mail: kvv_555@mail.ru)

SPIN: 7184-8977

Author ID: 512250

ORCID: 0000-0002-8669-1476

Researcher ID: AKK-8087-2021

ЧУБАРЬ Евгения Петровна, кандидат технических наук,

доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности»

Ростовский государственный университет путей сообщения

(344038, Россия, Ростов-на-Дону, площадь Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, дом 2,

e-mail: jeeeyn@mail.ru)

Аннотация. Оценка производственных рисков является жизненно важным компонентом безопасности на рабочем месте, помогая предприятиям выявлять потенциальные опасности и внедрять эффективные меры контроля для предотвращения несчастных случаев и травм. Проводя тщательную оценку рисков и используя результаты для принятия мер по обеспечению безопасности, работодатели могут создать более безопасную и здоровую рабочую среду для своих сотрудников. Данная проблематика приобретает особую актуальность в связи с усложнением технологий, появлением новых производственных средств и оборудования. Особое значение также играют высокие темпы Четвертой промышленной революции, которая существенным образом видоизменяет производственные задачи, а также способы и приемы их выполнения. В данном контексте цель статьи заключается в рассмотрении подхода к преобразованию параметров среды в показатели производственного риска на предприятиях. Методы исследования: анализ научно-технической литературы и нормативно правовой базы по охране труда; структурный анализ, вероятностно-статистические методы, методы формализации, анализ и синтез, группировка и обобщение. В статье предложен подход к оценке производственного риска с учетом параметров рабочей среды предприятия, который основан на моделях выявления потенциальных угроз безопасности в производственных условиях, а также с учетом запросов рынка и требований к сертификации продукции.

Ключевые слова: производство, среда, риск, оценка, травма, рабочий, требования, безопасность, охрана труда.

**TRANSFORMATION OF ENVIRONMENTAL PARAMETERS INTO INDICATORS OF PRODUCTION
RISK AT ENTERPRISES**

© The Author(s) 2024

BORISOVA Anastasia Viktorovna, candidate of technical sciences,
associate professor of the Department of "Life Safety"*Rostov State Transport University**(344038, Russia, Rostov-on-Don, Rostov Infantry Regiment Square, house 2, e-mail: nastja004@bk.ru)***BALANOVA Marina Vasilyevna**, candidate of technical sciences, associate
professor of the Department of "Life Safety"*Rostov State Transport University**(344038, Russia, Rostov-on-Don, Rostov Infantry Regiment Square, house 2, e-mail: fmv04@mail.ru)***KOZLYUK Vitaly Viktorovich**, candidate of technical sciences, associate professor of the Department of "Life Safety"
*Rostov State Transport University**(344038, Russia, Rostov-on-Don, Rostov Infantry Regiment Square, house 2, e-mail: kvv_555@mail.ru)***CHUBAR Evgeniya Petrovna**, candidate of technical sciences, associate professor of the Department of "Life Safety"
*Rostov State Transport University**(344038, Russia, Rostov-on-Don, Rostov Infantry Regiment Square, house 2, e-mail: jeeeyn@mail.ru)*

Abstract. Occupational risk assessment is a vital component of workplace safety, helping businesses identify potential hazards and implement effective controls to prevent accidents and injuries. By conducting a thorough risk assessment and using the results to implement safety measures, employers can create a safer and healthier work environment for their employees. This issue is of particular relevance due to the increasing complexity of technology and the emergence of new production tools and equipment. Of particular importance is also the high pace of the Fourth Industrial Revolution, which significantly modifies production tasks, as well as the ways and methods of their fulfillment. In this context, the purpose of the article is to consider the approach to the transformation of environmental parameters into indicators of production risk in enterprises. Research methods: analysis of scientific and technical literature and normative-legal base on labor protection; structural analysis, probabilistic-statistical methods, formalization methods, analysis and synthesis, grouping and generalization. The article proposes an approach to the assessment of production risk taking into account the parameters of the working environment of the enterprise, which is based on the models of identifying potential threats to safety in the production environment, as well as taking into account the market requirements and requirements for product certification.

Keywords: production, environment, risk, risk, assessment, injury, worker, requirements, safety, labor protection.

Для цитирования: Борисова А.В. Преобразование параметров среды в показатели производственного риска на предприятиях / А.В. Борисова, М.В. Баланова, В.В. Козлюк, Е.П. Чубарь // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 1(65). – С. 108-112. – EDN: OORISP.

Введение. Меры, направленные на обеспечение безопасных условий труда, принимаются для того, чтобы производственные процессы осуществлялись в среде, которая соответствует потребностям работников и способствует сохранению их здоровья. Если условия труда отвечают ожиданиям персонала, то достигаются прямые и косвенные выгоды, среди которых повышение эффективности, сокращение числа прогулов и снижение нагрузки [1]. С другой стороны, небезопасные условия труда нарушают производственные процессы. Факторы риска и производственный травматизм снижают эффективность работы. Несчастные случаи на производстве, заболевания и инциденты негативно влияют на результативность труда, что подтверждается соответствующими показателями [2].

Сырье, продукция, побочные продукты и оборудование являются наиболее важными элементами, включенными в производственную среду, которая призвана обеспечивать безопасность и охрану труда на предприятии. Сотрудники производства часто работают с тяжелой техникой и опасными материалами, которые повышают риск травм

или заболеваний на рабочем месте. Даже легкое оборудование может представлять опасность для сотрудников при неправильном использовании [3].

В данном контексте особое значение приобретает оценка параметров производственной среды на предмет рисков и угроз здоровью и жизнедеятельности работников. Оценка является важным аспектом безопасности на рабочем месте, поскольку помогает выявлять и контролировать потенциальные опасности, которые могут нанести вред сотрудникам. Это упреждающий подход к предотвращению несчастных случаев и поддержанию здоровой рабочей среды. В тоже время необходимо отметить, что несмотря на важность рассматриваемых вопросов, текущей проблемой является отсутствие методологий для достижения одновременной оценки рисков охраны труда и поддержки эффективной экономики производства, которая будет соответствовать запросам и требованиям рынка.

Таким образом, обозначенные обстоятельства обуславливают выбор темы данной статьи, а также подтверждают ее научно-практическую значимость.

Над обоснованием и разработкой риск-ориен-

тированного подхода при аттестации рабочих мест трудятся такие авторы как Вишневская Н.Л. [4], Петрушевская В.В., Саенко А.В. [5], Alireza Asgari, Muke Kibala [6], Eric Bonsang, Eve Caroli [7], Matthew D. Weaver, David Hostler [8].

Разработке математической модели оценки безопасности на рабочем месте посвятили свои публикации Фокин В.А., Редько С.В. [9], Овчинникова Т.И., Потоцкий Е.П., Фирсова В.М. [10], Vishal Patel, Austin Chesmore [11], Margaret C. Morrissey, Gabrielle J. [12], Jessica M. K. [13].

Методы управления рисками в области охраны труда, которые сосредоточены на снижении вероятности возникновения инцидентов и травм, описываются в работах Воробинской Л.И., Финоченко В.А., Финоченко Т.А. [14], Чмыхаловой С.В. [15], Чурбаковой О.В. [16], Тухбатуллиной К.С. [17].

Высоко оценивая труды современных авторов и их достижения, необходимо отметить, что ряд вопросов требует более детального рассмотрения и анализа. В частности, нерешенной является проблема автоматизированной (ре)конфигурации производственной среды, которая замедляется из-за ручного процесса сертификации безопасности. Также в уточнении нуждается модельно-ориентированный подход к оценке рисков безопасности производственной среды.

Методология. Цель статьи заключается в рассмотрении подхода к преобразованию параметров среды в показатели производственного риска на предприятиях.

Для достижения поставленной цели использовались такие методы как: анализ научно-технической литературы и нормативно правовой базы по охране труда, структурный анализ, вероятностно-статистические методы, методы формализации, анализа и синтез, группировка и обобщение.

Результаты. В производственной среде предприятия существует множество различных источников опасности, которые могут одновременно воздействовать на каждое рабочее место. По этой причине целесообразным является изучение как влияния отдельных детерминант, так и их совместное действие с учетом особенностей работы субъекта хозяйствования [18].

Общая цель преобразования параметров среды в показатели производственного риска на предприятиях – создать модель безопасности из каталога рисков, адаптированную к текущему оборудованию и планировке предприятия, а также к линейкам выпускаемой продукции, чтобы автоматически получить модели рисков безопасности производственной среды, которые являются основным исходным материалом для разработки мер по охране труда, технике безопасности и поддержке надлежащих условий жизнедеятельности персонала. Очевидно, что разработать как можно более полные модели этих рисков является достаточно сложной задачей. В данном случае считаем, что

автоматизация значительной части рутинной работы по маршрутизации значительно ускорит процесс.

Основываясь на имеющихся научных достижениях и практических рекомендациях автором разработан подход к определению набора релевантных производственных рисков на основе многократно используемых знаний о продукте, требований рынка, рабочей среде и исторических инцидентах на предприятиях. Формализованные тестовые примеры и стратегии анализа уже доказали свою эффективность в качестве механизма обеспечения качества линейки программных продуктов [19]. Подобно тому, как модульные тесты в программной инженерии обеспечивают качество отдельной единицы, например вызова функции или компонента, наш подход основан на модульных тестах безопасности для отдельных компонентов и оборудования в производственной среде. И подобно интеграционным тестам, которые объединяют результаты из различных частей и источников, наш подход дополняет тесты безопасности модулей тестами безопасности интеграции с рыночными требованиями. Эти тесты гарантируют, что при взаимодействии различных модулей друг с другом для создания общей системы не возникнет новых проблем с безопасностью. Обозначенная цель достигается путем моделирования потенциальных проблем безопасности для линейки продуктов и полуавтоматического определения угроз безопасности на основе набора доступного оборудования, планируемых рабочих процессов, заводских настроек и т.д.

Обзор предлагаемого подхода представлен на рисунке 1.

Для оценки рисков опасности машины или ситуации в предлагаемом методе используются два критерия – тяжесть вреда (S) и вероятность наступления вреда (P). Последний критерий подразделяется на 4 подкритерия: ($P1$) частота и ($P2$) продолжительность воздействия опасности, ($P3$) вероятность ее возникновения и ($P4$) возможность избежать/ограничить вред. Эти критерии объединяются в величину риска R по следующей формуле:

$$R = S \times (P1 + P2 + 2 \times P3 + P4)$$

Каждый из 5 параметров риска S , $P1$, ..., $P4$ основаны на числовой шкале оценки от 1 до 5 (1 – низкий риск, 5 – высокий риск). Например, шкалы для S таковы: (1) легкие травмы; (2) травмы, требующие более чем первой помощи; (3) серьезная инвалидность; (4) постоянная инвалидность; (5) смерть. Параметры вероятности риска $P1$, ..., $P4$ имеют соответствующие шкальные определения. Комбинированное значение R отражает уровень риска от низкого до высокого.

При проведении оценки производственного риска на основании параметров среды целесообразно использовать несколько источников данных, включая проверку и расследование на месте, эпидемиологическое расследование, надзор, компьютерное моделирование [20]. Ориентировочный перечень источников информации представлен в таблице 1.



Рисунок 1 – Подход к оценке риска производственной среды (составлено автором)

Таблица 1 – Источники информации для оценки производственного риска (составлено автором)

Критерий	Возможные классификации	Источники информации
Интенсивность воздействия	Высокая Средняя Низкая Отсутствует	Профиль рабочего места, оценка производственной безопасности и охраны труда, история травматизма и профессиональных заболеваний на рабочем месте
Частота воздействия	8 ч/неделю или более менее 8 ч/неделю нет прямого контакта	Профиль рабочего места, оценка состояния здоровья и безопасности окружающей среды
Опасности, создаваемые производственной средой в целом	Тяжелое заболевание Умеренное заболевание Легкое заболевание Болезнь маловероятна	Служба охраны труда на предприятии, профильное лечебное учреждение, данные врачей
Опасности, создаваемые материалами, оборудованием, способами и приемами работы	Тяжелое заболевание Умеренное заболевание Легкое заболевание Болезнь маловероятна	Паспорта безопасности материалов; сводные ведомости; стандарты по радиационной, химической и биологической безопасности; персонал по охране здоровья и безопасности окружающей среды; непосредственное наблюдение
Восприимчивость сотрудников	Прямая угроза Постоянное увеличение Временное увеличение	Медицинская оценка, обзор личных медицинских карт
Ожидаемая заболеваемость	Высокая Средняя Низкая	Опубликованные отчеты, опыт работы в промышленности
История профессиональных заболеваний или травм в данной должности или на рабочем месте	Распространенные Необычные Редкие/ исключительные	Отчеты о компенсациях работникам, журнал несчастных случаев и травмирования на предприятии

Обсуждение. В статье представлен количественный подход к оценке производственного риска на основании параметров рабочей среды предприятия. Его отличительной чертой является устранение проблемы субъективных суждений о частоте инцидентов и вероятности причинения вреда.

В то же время, необходимо отметить, что существует множество методов, которые можно использовать для добавления функций оптимизации к представленному моделированию, если это необходимо.

Выводы. В статье предложен подход к оценке производственного риска с учетом параметров рабочей среды предприятия, который основан на моделях выявления потенциальных угроз безопасности в производственных условиях, а также с учетом запросов рынка и требований к сертификации продукции. Благодаря этому подходу можно использовать знания

о рисках травматизма и несчастных случаев на любом предприятии для любого продукта, чтобы ускорить процессы сертификации безопасности на основе сквозной идентификации рисков.

Будущие исследования в данной предметной плоскости могут касаться формализации и стандартизации подхода оценки рисков производственной среды, чтобы можно было создавать автоматизированные инструменты, которые позволят использовать модели на предприятиях различных отраслей промышленности с незначительными модификациями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Щербаков С.Ю. Исследование опасных факторов производственной среды и факторов риска травмирования // Наука и Образование. – 2020. – № 2. – С. 58.
2. Медведева Г.Н. Оценка профессионального риска от

воздействия на работников вредных и опасных факторов производственной среды // Проблемы безопасности российского общества. – 2020. – № 2 (30). – С. 62-66.

3. Жолмагамбетов Н.Р. Оптимизация условий труда на основе оценки профессиональных рисков в производственной среде // Universum: технические науки. – 2021. – № 2-1 (83). – С. 10-13.

4. Вишневецкая Н.Л. Профессиональный риск для горнорабочих при многофакторном воздействии производственной среды // Безопасность труда в промышленности. – 2022. – № 8. – С. 82-87.

5. Петрушевская В.В., Саенко А.В. Распознавание риска в депрессивных средах производственного окружения // Сборник научных работ серии "Экономика". – 2023. – № 29. – С. 170-179.

6. Alireza Asgari, Muke Kibala A framework for the risk assessment of residual hazardous material in the dynamic environment of a composite production process considering operational time variation // Process Safety Progress. 2020. Volume 40, Issue 1. – P. 123-129.

7. Eric Bonsang, Eve Caroli Cognitive Load and Occupational Injuries // Industrial Relations: A Journal of Economy and Society. – 2021. – Volume 60. – P. 45-49.

8. Matthew D. Weaver, David Hostler Occupational Injury Prevention and Management // Emergency Medical Services: Clinical Practice and Systems Oversight. – 2021. – №6. – P. 113-117.

9. Фокин В.А., Редько С.В. Использование моделей эволюции риска для определения уровней риска развития заболеваний при воздействии факторов производственной среды и трудового процесса // Здоровье населения и среда обитания – ЗНиСО. – 2020. – № 7 (328). – С. 20-23.

10. Овчинникова Т.И., Потоцкий Е.П., Фирсова В.М. Риск-ориентированный подход при оценке опасностей в горной промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 2-1. – С. 199-208.

11. Vishal Patel, Austin Chesmore Trends in Workplace Wearable Technologies and Connected-Worker Solutions for Next-Generation Occupational Safety, Health, and Productivity // Advanced Intelligent Systems. – 2021. – № 1. – P. 49-53.

12. Margaret C. Morrissey, Gabrielle J. Brewer Impact of occupational heat stress on worker productivity and economic cost // American Journal of Industrial Medicine. 2021. Volume 64, Issue 12. – P. 98-105.

13. Jessica M. K. Streit Preparing the occupational safety and health workforce for future disruptions // American Journal of Industrial Medicine. – 2023. – № 78. – P. 134-139.

14. Воробинская Л.И., Финоченко В.А., Финоченко Т.А. Анализ методов оценки потенциальных рисков в области охраны труда предприятий железнодорожного машиностроения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 7. – С. 234-238.

15. Чмыхалова С.В. Системный подход к оценке риска, способствующий предотвращению потерь и повышению безопасности горного производства // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 6-1. – С. 146-153.

16. Чурбакова О.В. О концептуальных подходах к вопросам охраны труда // Безопасность жизнедеятельности. – 2020. – № 5 (233). – С. 3-9.

17. Тухбатуллина К.С. Управление рисками при проведении работ повышенной опасности // Аллея науки. – 2022. – Т. 1. – № 10 (73). – С. 365-370.

18. Шангареев Р.Р. Безопасное исполнение трудовых обязанностей – фундамент системы управления профессиональными рисками в организации // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2020. – № 2. – С. 139-156.

19. Исакова А.В. Проблемные вопросы внедрения культуры соблюдения требований охраны здоровья, техники безопасности и охраны окружающей среды в России // Пробелы в российском законодательстве. – 2020. – Т. 13. – № 4. С. 414-418.

20. Нарзиев Ш.М., Ботиров А.Б. Методы изучения и анализа рисков в трудовом процессе // тесНика. 2021. – № 1 (5). – С. 20-26.

Статья поступила в редакцию 10.01.2024

Статья принята к публикации 15.03.2024

УДК 331.45

EDN: OQPQSI

**ИССЛЕДОВАНИЕ СМАЧИВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПОВЕРХНОСТНО
АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ РЕСПИРАБЕЛЬНОЙ ФРАКЦИИ ПЫЛИ
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ МАССОВЫХ ВЗРЫВОВ**

© Автор(ы) 2024

SPIN: 5251-6351

AutorID: 352624

ORCID: 0000-0003-2074-9695

ResearcherID: AAI-1662-2019

ScopusID: 6603960148

КОРШУНОВ Геннадий Иванович, доктор технических наук,
профессор кафедры «Безопасности производств» Горного факультета
Первое высшее техническое учебное заведение России
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II
(199106, Россия, Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2, e-mail: korshunov_gi@pers.spmi.ru)

SPIN: 5494-9895

AutorID: 1152651

ORCID: 0000-0002-1261-6414

ResearcherID: AGJ-9262-2022

ScopusID: 57351406900

КАРИМОВ Артур Маратович, аспирант
Первое высшее техническое учебное заведение России
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II
(199106, Россия, Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2, e-mail: arturkarimov762@gmail.com)

Аннотация. На сегодняшний день борьба с профессиональными заболеваниями является одной из важных задач для экономики Российской Федерации. В горнодобывающей отрасли ситуация с количеством профессиональных заболеваний остается сложной и превышает общероссийский показатель в 16 раз. Влияние аэрозолей преимущественно фиброгенного действия на сотрудников горнодобывающих предприятий приводит к развитию болезней органов дыхания, что является ведущей причиной временной нетрудоспособности. Аэрозоли преимущественно фиброгенного действия формируют вредные условия труда на сотрудников горнодобывающих предприятий. Аэротехногенное воздействие оказывает пыль, в частности наиболее её вредная респираторная фракция. Пыль выделяется при различных технических этапах добычи полезных ископаемых, но наиболее мелкая и вредная респираторная фракция в больших количествах выделяется в результате перемалыванием породы при производстве массовых взрывов. В работе приведены результаты лабораторного исследования смачивающей способности различных поверхностно-активных веществ. Поверхностно-активные вещества исследовались как по отдельности, так и вместе в различных пропорциях, подбирались комбинация веществ, которая позволит снизить выделение пыли наиболее вредной респираторной фракции при производстве массовых взрывов. Применять исследуемые поверхностно-активные вещества можно в качестве гидрозабойки взрываемых скважин либо использовать в оросительных установках, что позволит снизить пылевыведение и на других технологических этапах.

Ключевые слова: пыль, массовые взрывы, профессиональные заболевания, временная нетрудоспособность, респираторная пыль, поверхностно-активные вещества, пневмокониозы, пылеподавление, открытые горные работы, гидрозабойка.

**INVESTIGATION OF THE WETTING ABILITY OF SURFACTANTS TO SUPPRESS
THE RESPIRATORY FRACTION OF DUST IN THE PRODUCTION OF MASS EXPLOSIONS**

© The Author(s) 2024

KORSHUNOV Gennadiy Ivanovich, doctor of technical sciences,
professor of «Department of Industrial Safety» Mining Faculty
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University
(199106, Russia, St. Petersburg, 21st line V.O., 2, e-mail: arturkarimov762@gmail.com)

KARIMOV Artur Maratovich, post-graduate student
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University
(199106, Russia, St. Petersburg, 21st line V.O., 2, e-mail: korshunov_gi@pers.spmi.ru)

Abstract. To date, the fight against occupational diseases is one of the most important tasks for the economy of the Russian Federation. In the mining industry, the situation with the number of occupational diseases remains difficult and exceeds the national figure by 16 times. The effect of aerosols of predominantly fibrogenic action on employees of mining enterprises leads to the development of respiratory diseases, which is the leading cause of temporary disability.

Aerosols of predominantly fibrogenic action form harmful working conditions for employees of mining enterprises. Aerotechnogenic effects are caused by dust, in particular its most harmful respiratory fraction. Dust is released during various technical stages of mining, but the smallest and most harmful respirable fraction is released in large quantities as a result of over-grinding of rock during the production of mass explosions. The paper presents the results of a laboratory study of the wetting ability of various surfactants. Surfactants were studied both individually and together in various proportions, a combination of substances was selected that would reduce the emission of dust of the most harmful respiratory fraction during the production of mass explosions. The studied surfactants can be used as a hydraulic seal for exploding wells or used in irrigation installations, which will reduce dust emission at other technological stages.

Keywords: dust, mass explosions, occupational diseases, temporary disability, respiratory dust, surfactants, pneumoconiosis, dust suppression, open-pit mining, hydraulic fracturing.

Для цитирования: Коршунов Г.И. Исследование смачивающей способности поверхностно активных веществ для подавления респиральной фракции пыли при производстве массовых взрывов / Г.И. Коршунов, А.М. Каримов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 1(65). – С. 113-118. – EDN: OQRPQSJ.

Введение. По данным Росстата в 2021 году в Российской Федерации на предприятиях с вредными и (или) опасными условиями труда было занято 36,4% или 4,7 миллиона рабочих от списочной численности работников по обследованным организациям [1,2].

Роспотребнадзором в 2022 году было проанализировано процентное распределение впервые приобретенных профессиональных заболеваний работниками различных отраслей:

1. На предприятиях по добычи полезных ископаемых» 40,32% (в 2021 39,4%) от всех приобретенных профессиональных заболеваний;
2. На обрабатывающих производствах 28,44%;
3. В области здравоохранения и социальных услуг

14,63%;

4. На предприятиях по транспортировке и хранению 9,71%.

Из выше следующего следует вывод, что у персонала горнодобывающих компаний самый высокий шанс получить профессиональное заболевание (табл. 1).

На предприятиях осуществляющих добычу полезных ископаемых в 2021 году Росстатом было проанализировано 824 тысячи рабочих мест, с аэротехногенным воздействием аэрозолей преимущественно фиброгенного действия (далее АПФД) приходится 6,94% или 57,2 тысячи рабочих мест, ниже представлено процентное распределение вредных факторов на рабочих местах (рис. 1)[3,4].

Таблица 1 – Показатели профессиональной заболеваемости по основным видам экономической деятельности за период 2018-2022 гг. в Российской Федерации (на 10 тыс. работающих)

Виды экономической деятельности	2018	2019	2020	2021	2022
Российская Федерация	1,17	1,03	0,78	1,09	1,00
«Добыча полезных ископаемых»	25,01	21,15	15,2	18,36	16,44
«Обрабатывающие производства»	2,16	2,18	1,38	1,57	1,83
«Транспортировка и хранение»	1,69	1,66	1,06	1,08	1,27
«Деятельность в области здравоохранения и социальных услуг»	0,27	0,27	1,9	3,00	1,52

* составлено авторами

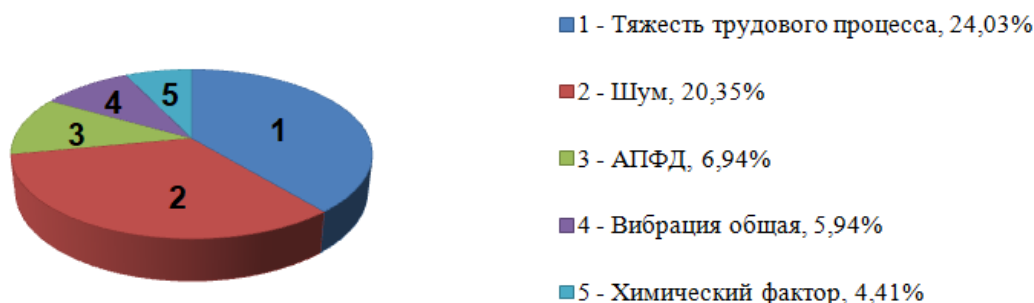


Рисунок 1 – Процентное распределение вредных факторов на рабочих местах на предприятиях по добычи полезных ископаемых (составлено авторами)

Временная нетрудоспособность работников горнодобывающего предприятия серьезная экономическая проблема, она может занимать длительный период времени, привести к развитию хронических профессиональных заболеваний, что в

дальнейшем сделает выполнение ряда обязанностей невозможным [5,6]. Ведущая причина временной нетрудоспособности в 2021 году аэротехногенное воздействие, ведущее к заболеванию органов дыхания (рис. 2).

К заболеваниям органов дыхания приводит аэротехногенное воздействие респираторной фракции пыли которая выделяется на карьерах и разрезах при выполнении различных технических операций по добыче полезного ископаемого [7-14].

Ежегодно, в атмосферу карьеров поступает от 300 до 500 тысяч тонн пыли с размерами частиц менее 100 мкм. Среди всех технологических процессов следует выделить, массовые взрывы, в результате

которых происходит многократное переизмельчения породы и образование мельчайших фракций пыли [15,16]. Образованная в результате массового взрыва респираторная фракция пыли с течением времени оседает и повторно взмывается под влиянием ветра или других технологических процессов.

Ниже представлена наглядная структура выбросов пыли по различным технологическим процессам (рис. 3) [17-22].

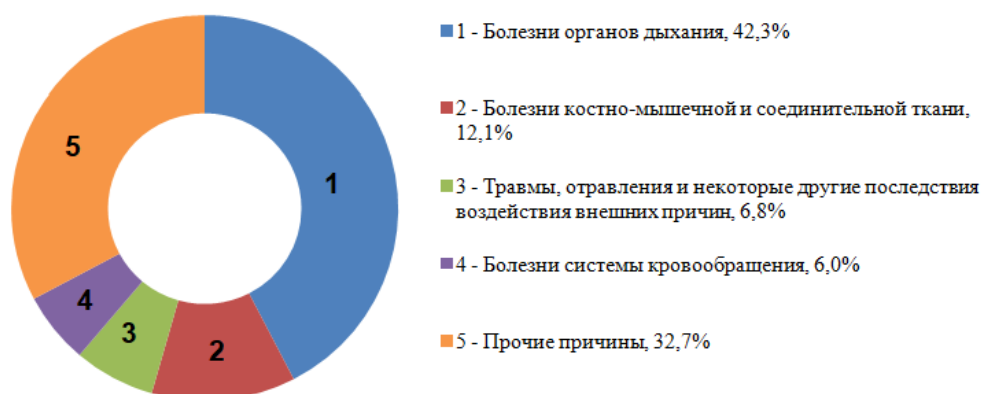


Рисунок 2 – Процентное распределение травм и заболеваний, приведших к временной нетрудоспособности работников предприятий по добыче полезных ископаемых (составлено авторами)

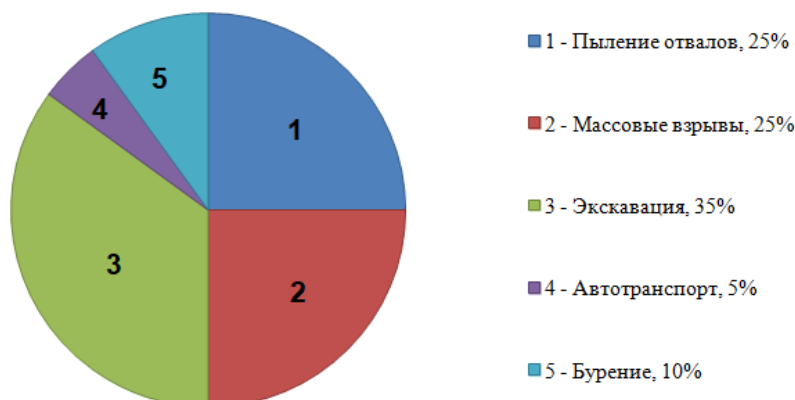


Рисунок 3 – Процентное распределение выбросов пыли по различным технологическим процессам (составлено авторами)

Исследования в области пылеподавления с применением поверхностно-активных веществ (далее ПАВ) велись следующими научными сотрудниками: Корнев А.В., Корнева М.В., Лещинский А.В., Шевкун Е.Б в работах вышеперечисленных ученых представлены данные об пылеобразовании, на карьерах и разрезах, также результаты лабораторных исследований смачивающей способности ПАВ относительной угольной пыли различных марок. В этих работах акцент не ставился на наиболее вредную респираторную фракцию пыли, исследования смачивающей способности ПАВ проводились только на угольной пыли, тогда как респираторная фракция гранитной пыли, образованная в результате массового взрыва, не исследовалась.

Методология. В данной работе планировалось изучить смачивающую способность различных ПАВ на примере гранита собранного в результате натур-

ных исследований на Гавриловском карьере.

В научной работе использовался комплексный подход к проводимым исследованиям:

1. Анализ научных исследований и нормативной документации, содержащей требования к параметрам лабораторного исследования смачивающей способности ПАВ, атмосферы на карьерах, методики их оценки.

2. Лабораторные исследования дисперсного состава фракции пыли осевшей после массового взрыва.

3. Лабораторные исследования смачивающей способности анионных, неионогенных и амфотерных ПАВ на граните с Гавриловского карьера.

Образцы для лабораторного исследования собирались на Гавриловском карьере в специальные пылесборники, куда оседала пыль после массового взрыва. Осевшая пыль была проанализирована с помощью научного центра «Проблем переработки

минеральных и техногенных ресурсов» на Micro Sizer 201, полученная фракция 63 мкм необходима для проведения лабораторного исследования. Лабораторный эксперимент проводился согласно стандарту СТО 00173769-005-2014 «Методы определения смачивающей способности растворов поверхностно-активных веществ по отношению к пыли угольных шахт», данный стандарт также подходит и для изучения гранитной пыли [23-30].

Результаты. Исследовались следующие ПАВ: кокоамфодиацетат натрия, триполифосфат натрия, кокосульфат натрия и кокоглюкозид. Кокоамфодиацетат натрия, амфотерное ПАВ, которое позволяет эффективно смачивать пыль, имеющую как положительный, так и отрицательный заряд. Триполифосфат натрия и кокосульфат натрия, анионные ПАВ, которые при низкой концентрации безвредны,

их преимущество стоимость, она ниже, чем у амфотерных и неионогенных ПАВ. Кокоглюкозид, неионогенное ПАВ, данный тип ПАВ наиболее безопасен для людей [31-35].

В ходе эксперимента готовились навески пыли фракции 63 мкм по 10 мг каждая, растворы ПАВ по 100 мл с различной концентрацией от 1% до 0,005%, далее пыль высыпалась в раствор ПАВ и засекалось время до полного смачивания частиц пыли на поверхности раствора, для каждой концентрации проводилось от 3 до 5 измерений. У дистиллированной воды частиц пыли не смачиваются (далее Н/С), что подтверждает необходимость применения ПАВ в растворах для пылеподавления мельчайшей респираторной фракции, далее приведены результаты лабораторного исследования смачивающей способности ПАВ (табл. 2).

Таблица 2 – Смачивающая способность исследуемых поверхностно-активных веществ для гранита с Гавриловского карьера

Название ПАВ	Время смачивания в зависимости от концентрации раствора, с.					
	1%	0,5%	0,1%	0,05%	0,01%	0,005%
Кокоамфодиацетат натрия	4,81	8,20	16,39	64,88	Н/С	Н/С
Триполифосфат натрия	56,97	130,22	Н/С	Н/С	Н/С	Н/С
Кокосульфат натрия	8,30	18,57	33,61	Н/С	Н/С	Н/С
Кокоглюкозид	4,31	6,57	17,51	41,43	55,90	90,70
Комбинация ПАВ (кокоглюкозид и кокоамфодиацетат натрия)	4,58	8,49	19,42	39,32	51,87	78,45

* составлено авторами

Анионные ПАВ обладают низкими показателями смачиваемости, тогда как кокоглюкозид даже при сверхнизких концентрациях позволяет добиваться удовлетворительного показателя смачиваемости менее 50 с., кокоамфодиацетат натрия слабоэффективен при низких концентрациях, однако применяя его совместно с кокоглюкозидом, он позволяет снизить время смачивания при концентрациях менее 0,1%.

В результате эксперимента было определено, что комбинация неионогенного (кокоглюкозида) и амфотерного (кокоамфодиацетата натрия) ПАВ в пропорции 85% кокоглюкозида к 15% кокоамфодиацетата натрия имеет наименьшее время смачивания при низких концентрациях раствора. Наиболее эффективно будет применять данный состав с концентрацией раствора 0,05%, данная концентрация позволит добиться время смачивания менее 50 с. и будет относительно экономичной.

Обсуждение. Время смачивания изученными ПАВ гранитной пыли относительно угольной пыли значительно меньше, что обуславливается рядом причин. У гранита выше плотность, что дает частицам пыли большую массу и увеличивает время их осаждения, а также у угля выше пористость, что напрямую влияет на смачиваемость частиц пыли. Пористые материалы пропускают в себя часть ПАВ, что требует больше времени на смачивание, особенно когда пыль находится на поверхности раствора.

В кандидатской диссертации Корневой Марии Валерьевны представлены результаты исследования

смачивающей способности различных ПАВ, в частности кокоглюкозида. Время смачивания угольной пыли фракции 63 мкм кокоглюкозидом значительно превышает значения, полученные в аналогичном исследовании, представленном в данной статье, но с гранитной пылью. Хотя обе работы выполнены по одному стандарту СТО 00173769-005-2014 «Методы определения смачивающей способности растворов поверхностно-активных веществ по отношению к пыли угольных шахт» результаты значительно различаются из-за физико-химических свойств самой пыли.

В зависимости от физико-химических и физико-механических свойств породы, из которой образуется респираторная фракция пыли, могут меняться показатели смачиваемости различных ПАВ, что обуславливает подбор ПАВ под конкретные условия разрабатываемого месторождения.

Применение ПАВ для подавления респираторной фракции угольной пыли одна из известных мер для снижения аэротехногенного воздействия на сотрудников горнодобывающего предприятия, однако с гранитной пылью данный способ применяется намного реже, тогда как гранитная пыль намного быстрее смачивается и осаждается ПАВ.

Использование в составе гидрозабойки ПАВ не новая идея, данная технология применялась более полувека назад, однако выбору ПАВ не уделялось так много внимания, особенно скорости смачивания им взрываемой породы.

В дальнейшем авторами планируется расширить перечень исследуемых ПАВ и проследить зависимости скорости смачивания при различных концентрациях различными типами ПАВ.

Выводы. Аэротехногенное воздействие респираторной фракции пыли приводит к заболеваниям органов дыхания, что является ведущей причиной временной нетрудоспособности работников горнодобывающих предприятий.

Ведение буровзрывных работ – основной источник выделения наиболее вредной респираторной фракции пыли, образующейся при многократном измельчении породы в результате производства массового взрыва на карьерах и разрезах.

Применение 0,05% раствора кокоглюкозида и кокоамфодиацетата натрия в пропорции 85% на 15% значительно повышает смачивающие свойства гидрозабойки, данный раствор ПАВ позволяет снизить выход респираторной фракции пыли при производстве массовых взрывов на 40% и более.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Сюрин С.А., Гушин И.В., Никанов А.Н. Профессиональная патология работников различных производств медно-никелевой промышленности Крайнего Севера // Экология человека. – 2012. – № 6. – С. 8-12.
2. Чеботарёв А.Г. Риски развития профессиональных заболеваний пылевой этиологии у работников горнорудных предприятий // Горная промышленность. – 2018. – № 3 (139). – С. 66-70. <http://dx.doi.org/10.30686/1609-9192-2018-3-139-66-70>
3. Алексеев В.Н. Анализ несчастных случаев и профзаболеваний на разрезе «Нерюнгринский» // ГИАБ. – 2009. – №12. – С. 87-91.
4. Способы и средства повышения экологической безопасности массовых взрывов в железорудных карьерах по пылевому фактору / В.Е. Колесник, А.А. Юрченко, А.А. Литвиненко, А.В. Павличенко; Днепропетровск: Монография, 2014. – 112 с.
5. Смирнякова В.В. О долгосрочной программе обеспечения промышленной и экологической безопасности в угольной отрасли // Записки Горного Института. – 2014. – Т. 207. – С. 155-158.
6. Захаренков, В.В. / Захаренков В.В., Олещенко А.М., Пананотти Е.А., Суржинов Д.В. Комплексная оценка риска для здоровья работающих при открытой добыче угля от воздействия физических факторов // Бюллетень ВСНЦ СО РАМН. – 2006. – №3. – С. 49-52.
7. Сарапулова Г.И. Геохимический подход в оценке воздействия техногенных объектов на почвы // Записки Горного Института. – 2020. – Т. 243. – С. 388-392. DOI:10.31897/PMI.2020.3.388.
8. Шувалов Ю.В., Мохаммад А., Бульбашев А.П. Предотвращение пылегазовых выбросов и снижение запыленности атмосферы в карьерах // ГИАБ. – 2000. – № 5. – С. 69-72.
9. Fisse A., Kuzu C., Hüdaverdi T. Prediction of environmental impacts of quarry blasting operation using fuzzy logic // Environ Monit. Assess. – 2011. – V. 174. – P. 461-470.
10. Gualtieri C., Angeloudis A., Bombardelli F., Jha S., Stoesser T. On the values for the turbulent Schmidt number in environmental flows // Fluids. – 2017. – V. 2. – P.17-19.
11. Joseph G.M.D., Lowndes I.S., Hargreaves D.M. A computational study of particulate emissions from Old Moor Quarry, UK // J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2018. – V. 172. – P. 68-84.
12. Зыков Ю.Н., Перник Л.М., Спивак А.А., Выпадение пыли из газопылевого облака при массовом взрыве на карьере // Нестационарные процессы в верхних и нижних оболочках Земли (Геофизика сильных возмущений): сб. науч. тр. – М.: ИГД РАН, 2002. – С. 481-482.
13. Менжулин, М.Г., Парамонов Г.П., Шишов А.Н. Метод расчета параметров волн напряжений и диссипации энергии в области разрушения горных пород при взрыве удлиненных зарядов различных составов и конструкций // Наука в СПГТИ. – СПб.: СПГТИ, 1998. – Вып. 3. С. 205-219.
14. Тихонова О.В. Обоснование параметров буровзрывных работ для снижения пылегазообразования при массовых взрывах на карьерах строительных материалов. СПб.: СПГТИ, 2006. – 211 с.
15. Каркашадзе Г.Г., Новиков И.В. Разработка эффективного способа пылеподавления при производстве массовых взрывов на рудных карьерах // Записки Горного Института. – 2001. – Вып. 4. – С. 50-56.
16. Lesier M., Metais O. New Trends in Large-Eddy Simulations of Turbulence // Annual Rev. Fluid. Mech. – 1996. – V. 28. – P. 45-82.
17. Patra A.K., Gautam G., Kumar P. Emissions and human health impact of particulate matter from surface mining operation – A review // Environ. Technol. Innovation. – 2016. – V. 5. – P. 233-249.
18. Новиков И.В. Обоснование и разработка способа пылеподавления с реализацией процесса насыщения водой пылевого облака при взрывных работах на карьерах. М.: МГТУ, 2002. – 46 с.
19. Roy S., Adhikari G.R., Singh T.N. Development of emission factors for quantification of blasting dust at surface coal mines // J. Environmental Protection. – 2010. – V. 1. – № 4. – P. 346-361.
20. Sairanen M., Rinne M., Selonen O. A review of dust emission dispersions in rock aggregate and natural stone quarries // International J. Mining, Reclamation and Environment. – 2017. – V. 32. – №3. – P. 196-220.
21. Сафина А.М. Обоснование параметров гидрообеспыливания для снижения аэротехногенного воздействия автодорог на персонал угольных разрезов. СПб.: СПГУ, 2019. – 93 с.
22. Ларичев А.Ю. Обоснование рациональных параметров буровзрывных работ для снижения вредных выбросов пыли и газа при производстве массовых взрывов на карьерах. М.: СПбГТИ, 2012. – 153 с.
23. Корнев А.В., Ледаев 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.
24. Афанасьев П.И., Павлович А.А., Василец В.Н. Обеспечение условий безопасной эксплуатации горнотранспортного комплекса при воздействии сейсмозрывных волн / Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 1. – С. 26-35.
25. Гендлер С.Г., Борисовский И.А. Оценка влияния температурных условий на естественную вентиляцию глубоких карьеров Арктической зоны // Устойчивое развитие горных территорий. – 2022. – Т. 14. – № 2. – С. 218-227. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-218-227.
26. Silvester S.A., Lowndes I.S., Hargreaves D.M. A computational study of particulate emissions from an open pit quarry under neutral atmospheric conditions // Atmos. Environ. – 2009. – V. 43. – P. 6415-6424.
27. Torno S., Toraño J., Menéndez M., Gent M. CFD simulation of blasting dust for the design of physical barriers // Environ. Earth Sci. – 2010. – V. 64. – P. 73-83.
28. Гендлер С.Г., Прохорова Е.А. Оценка совокупного влияния производственного травматизма и профессиональных заболеваний на состояние охраны труда в угольной промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. – № 10-2. – С. 105-116. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_102_0_105.
29. Рудаков М.Л., Дука Н.Е. Изучение свойств звукопоглощающих материалов при конструировании средств индивидуальной защиты органа слуха // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 3. – С. 165-180. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_3_0_165.
30. Хохлов С.В., Виноградов Ю.И., Носков А.П., Баженова А.В. Прогнозирование смещения рудных контуров при формировании развала взорванной горной массы // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 3. – С. 40-56. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_3_0_40.

31. Молдован Д.В., Чернобай В.И., Соколов С.Т., Баженова А.В. Конструктивные решения запираания продуктов взрыва во взрывной полости // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6-2. – С. 5-17. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_5.

32. Shuvalov V.V., Artem'eva N.A., Kosarev I.B. 3D hydrodynamic code SOVA for multimaterial flows, application to Shomaker-levy 9 problem // International J. Impact Engineering. 1999b. – V. 23. – № 1. – P. 847-858.

33. Кольвах К.А. Оценка и управление риском травматизма подземного персонала при обрушении горных пород на угольных шахтах Кузбасса // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 3. – С. 124-132. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_3_0_124

34. Романченко С.Б., Нагановский Ю.К., Корнев А.В. Инновационные способы контроля пылевзрывобезопасности горных выработок // Записки Горного института. – 2021. – Т. 252. – С. 927-936. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.14.

35. 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.

Статья поступила в редакцию 31.01.2024

Статья принята к публикации 15.03.2024

УДК: 620.95

EDN: WJVAXP

УТИЛИЗАЦИЯ ВЫСШИХ ВОДНЫХ РАСТЕНИЙ С ЦЕЛЬЮ ПОЛУЧЕНИЯ БИОГАЗА

© Авторы 2024

SPIN: 1159-95606

AuthorID: 109785

ORCID: 0000-0002-7151-5998

ScopusID: 56225536000

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)*

SPIN: 3111-6804

AuthorID: 1096928

ORCID: 0009-0002-3627-281X

ScopusID: 57221258737

ШИНКЕВИЧ Полина Сергеевна, аспирант*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого**(Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, e-mail: ps.shinkevich@gmail.com)*

SPIN: 1450-4720

AuthorID: 1134326

БОНДАРЕНКО Кристина Александровна, магистрант Высшей школы техносферной безопасности*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого**(Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, e-mail: metsheryakova.ka@edu.spbstu.ru)*

SPIN: 6516-2037

AuthorID: 478195

ORCID: 0000-0002-9520-4094

ResearcherID: AAE-9510-2019

ЕФРЕМОВА Саня Юнусовна, доктор биологических наук, профессор,

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. Высшие водные растения могут оказывать негативное воздействие на водную экосистему. Их чрезмерное разрастание изменяет условие среды в водоеме и водотоке, а также мешает судоходству, рыбоводству и другим сферам общественной жизни. Вследствие полученных данных были проанализированы современные технологии удаления макрофитов из водоемов и дальнейшей их утилизации. Наиболее экологически и экономически привлекательный способ – сбор и дальнейшее анаэробное сбраживание высших водных растений с целью получения биогаза. Для подтверждения выдвинутой гипотезы был проведен эксперимент по анаэробному сбраживанию высших водных растений. Было установлено, что максимальный процент метана был зафиксирован в биореакторе №4 на 44 сутки от начала эксперимента – 56% метана, где содержалась 75% биомассы высших водных растений в соотношении с 25% инокулянта. Полученные в работе результаты свидетельствуют о том, что макрофиты в смеси с инокулянтом в вышеприведенном соотношении являются эффективным композиционным составом для получения биогаза с высоким содержанием метана. Итоговые выводы статьи выделяют потенциальные преимущества использования высших водных растений в производстве биогаза для достижения устойчивого развития и снижения негативного воздействия на окружающую среду.

Ключевые слова: анаэробное сбраживание, биогаз, высшие водные растения, метан, альтернативные источники энергии, макрофиты.

UTILIZATION OF HIGHER AQUATIC PLANTS IN ORDER TO OBTAIN BIOGAS

© The Authors 2024

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. Politekhnikeskaya, 29, e-mail: politaevana1971@gmail.com)*

VELMOZHINA Ksenia Alekseevna, postgraduate student,
*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
(Russia, 195251, St. Petersburg, st. Politekhnikeskaya, 29, e-mail: anizhomlev@mail.ru)*

SHINKEVICH Polina Sergeevna, postgraduate student,
*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
(Russia, 195251, St. Petersburg, st. Politekhnikeskaya, 29, e-mail: ps.shinkevich@gmail.com)*

BONDARENKO Kristina Aleksandrovna, master's student at the Higher School of Technosphere Safety
*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
(Russia, 195251, St. Petersburg, st. Politekhnikeskaya, 29, e-mail: metscheryakova.ka@edu.spbstu.ru)*

EFREMOVA Sania Yunusovna, doctor of biological sciences, professor,
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. Higher aquatic plants can have a negative impact on aquatic ecosystems. Their excessive growth alters the environmental conditions in water bodies and watercourses, as well as obstructs navigation, fisheries, and other aspects of public life. As a result of the data obtained, modern technologies for removing macrophytes from water bodies and their subsequent utilization have been analyzed. The most environmentally and economically attractive method is the collection and further anaerobic digestion of higher aquatic plants to produce biogas. To confirm the hypothesis, an experiment on anaerobic digestion of higher aquatic plants was conducted. It was found that the maximum percentage of methane was recorded in bioreactor No. 4 on the 44th day of the experiment – 56% methane, where 75% of higher aquatic plant biomass was present in a ratio to 25% inoculum. The results obtained in the study indicate that macrophytes in a mixture with inoculum in the aforementioned ratio are an effective compositional composition for obtaining biogas with a high methane content. The final conclusions of the article highlight the potential benefits of using higher aquatic plants in biogas production to achieve sustainable development and reduce negative environmental impact.

Keywords: anaerobic digestion, biogas, higher aquatic plants, methane, alternative energy sources, macrophytes.

Для цитирования: Политаева Н.А. Утилизация высших водных растений с целью получения биогаза / Н.А. Политаева, К.А. Вельможина, П.С. Шинкевич, К.А. Бондаренко, С.Ю. Ефремова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 1(65). – С. 119-126. – EDN: WJVAXP.

Введение. В современном мире вопрос энергетической устойчивости и независимости становится все более актуальным. В поисках альтернативных источников энергии, способных уменьшить зависимость от ископаемых топлив и снизить негативное воздействие на окружающую среду (далее – ОС), все больше внимания привлекает использование биогаза. Биогаз, получаемый в результате анаэробного сбраживания органических веществ, представляет собой ценный источник энергии, способный диверсифицировать источники энергии и уменьшить зависимость от традиционных ископаемых топлив, таких как нефть и природный газ.

В контексте изменения климата и необходимости сокращения выбросов парниковых газов использование биогаза из высших водных растений представляет собой не только экономически выгодную альтернативу, но и экологически устойчивое решение. Кроме того, развитие технологий по производству и использованию биогаза способствует созданию новых рабочих мест и стимулирует инновационное развитие в области обновляемых источников энергии. Помимо этого, биогаз является коммерчески привлекательным направлением развития энергетического сектора, так как для его получения используются органические отходы, которые обычно являются бесплатным ресурсом.

Это создает дополнительную экономическую выгоду для предприятий и организаций, занимающихся производством биогаза. В то же время, биогаз сам по себе имеет рыночную стоимость и может быть продан как товар, что открывает дополнительные возможности для прибыльных инвестиций в данной сфере.

В настоящее время стоит вопрос об утилизации высшей водной растительности, поскольку их чрезмерное зарастание в водоеме является весомым недостатком. Высшие водные растения (макрофиты) – это крупные водные растения, доступные наблюдению невооруженным глазом, которые напоминают настоящие растения, имея стебли и листья. Они являются одним из основных компонентов биоценоза, играют важную роль в общем биологическом режиме водоема, в регулировании химических и биологических процессов, участвуют в системах самоочищения, а также препятствуют «цветению» воды [1]. Макрофиты выполняют функцию индикатора химических и физических условий ОС, обогащают воду кислородом, предохраняют берега от эрозии [2]. Высшие водные растения могут являться механическими фильтрами взвесей в водоеме, тем самым оказывая положительное воздействие на качество воды [3-5].

В одном из проведенных исследований было

выявлено, что у водных растений наблюдается определенная специфичность в поглощении и накоплении минеральных веществ из водоемов [6]. Эта специфичность особенно ярко проявляется в накоплении калия (*K*) и кальция (*Ca*) [7]. Подобные наблюдения встречаются и при изучении накопления фосфора [8], а также поглощении ионов меди (*Cu*) [9] высшими водными растениями. В дополнение к минеральным элементам, высшие водные растения также поглощают различные углеводы, аминокислоты и органические кислоты из водоемов [10]. Одно из исследований показало, что при биомассе 100 г *Scirpus lacustris* (камыш озерный) способен извлечь из воды 4 мг фенола [11-12]. Эти растения играют значительную роль в аэробном самоочищении водоема, способствуя быстрому началу этой фазы и улучшая кислородный режим водоема [13]. Кроме того, известно, что рясковые эффективно очищают воду в стоячих водоемах и прудах [14].

В литературе отмечается, что помимо положительного влияния высших водных растений, существует их негативное воздействие, проявляющееся при чрезмерном разрастании в водоемах. Это разрастание препятствует нормальной работе гидротехнических сооружений в каналах из-за попадания частей растений в агрегаты, снижает пропускную способность и увеличивает расход воды на транспирацию [15]. Избыточное развитие макрофитов способно существенно изменить условия среды как в микрореконструкциях вблизи растений, так и в общем водоеме или водотоке. В зарослях макрофитов наблюдается замедление скорости течения, аккумуляция песка, детрита и ила, изменения содержания *O* и *CO*₂ в воде в разное время суток, повышение температуры и воздействие на световой режим, а также изменения *pH* [16]. Заращение водной растительностью способно нанести ущерб рыбоводству, способствует накоплению органических веществ и образованию болотных участков, ухудшает гидрохимический режим и подавляет развитие планктонных и бентосных организмов, что может привести к дальнейшим экологическим проблемам [16], а также приводит к ухудшению качества воды вследствие гибели растений [17].

Существуют также проблемы, связанные с использованием водоемов в качестве зон отдыха – чрезмерный рост и распространение макрофитов может значительно ухудшить условия для купания [18]. Объемные скопления высших водных растений также способны препятствовать проходу судов и катеров. Отмершие растительные остатки также могут скапливаться в узких местах водоемов и препятствовать естественному стоку воды, что может привести к ее резервированию или даже к наводнению [19].

Данную экологическую проблему изучали многие ученые. Например, исследователи из Китая [20] рассмотрели три основных метода по борьбе с разрастанием водной растительностью: физический

метод, химический метод и биологический метод, а также проанализировали сферы их применения, описали преимущества и недостатки каждого из методов.

Наиболее перспективным и эффективным подходом является применение биологических методов, включая интродукцию растительных рыб в водоемы. Особую значимость в этом контексте представляет белый амур, который является высокоэффективным фитофагом [21], способным потреблять практически все виды водной флоры. Практика использования белого амура в биологической мелиорации каналов и водохранилищ продемонстрировала его высокую эффективность. Высшие водные растения играют ключевую роль в рационе многих водоплавающих птиц. Гуси, утки и лысухи с удовольствием потребляют стебли, листья и молодые побеги камыша. Лебеди предпочитают питаться подводными частями растений, иногда также камышом и рогозом. Ряд нырковых уток предпочитает вегетативные части и плоды более чем тридцати видов высших водных растений.

Механический способ основан на очистке водных объектов от лишней растительности, считается достаточно эффективным способом, однако направлен на кратковременный, но быстрый результат [22]. Химический способ направлен на уничтожение водной растительности путем добавления препаратов-гербицидов [23]. Однако данный метод часто имеет пагубные последствия, которые проявляются не сразу.

К наиболее простому и дешевому способу борьбы с зарастанием относят удаление растительности по мере их появления [23], удаление растительности из водоема происходит граблями, различными орудиями и механизмами, подтяжки к берегу веревками. Все виды скошенной растительности также можно использовать для удобрения прудов [23].

В настоящее время стратегии борьбы с зарастанием водоемов ориентируются на контроль за избыточным развитием как жестких, так и мягких растительных формаций. Считается, что удаление водных растений необходимо проводить в случаях, когда их площадь занимает более 20-30% поверхности водного объекта.

Восстановление водных объектов включает в себя различные мероприятия, направленные на восстановление и поддержание природного гидрологического режима, утилизацию отходов и снижения уровня их загрязнения [24]. Высшие водные растения не подходят для компостирования из-за высокого содержания воды. Однако, эта водная биомасса является привлекательным субстратом для производства биогаза [25]. Для обеспечения эффективной утилизации отходов и восстановления водных объектов от зарастания высшей водной растительности, предлагается использовать их в качестве смеси для анаэробного сбраживания с целью получения биогаза.

Необходимость сбора биомассы водных расте-

ний и связанные с этим затраты требуют возможности использования данных отходов в качестве биомассы для получения энергии. Данный способ утилизации макрофитов также имеет дополнительные экологические и экономические перспективы. Основные экологические преимущества связаны со снижением зависимости от ископаемого топлива при производстве энергии, а также с сокращением выброса парниковых газов, которые пагубно влияют на изменение климата [26-27]. Помимо этого, использование сырья третьего поколения (микроводоросли, макрофиты) для производства экологически чистой энергии позволило бы решить земельную проблему, возникающую при использовании традиционного сырья первого и второго поколений (кукуруза, пшеница, сахарная свекла, сахарный тростник) [28]. Использование макрофитов не конкурирует с сельскохозяйственным землепользованием для производства продуктов питания и кормов и не нуждается в какой-либо сельскохозяйственной земле или обработке (удобрении и т.д.).

Экономический аспект вопроса рассматривается с точки зрения получения дешевой энергии благодаря тому, что высшие водные растения являются отходом, требующим утилизации. Помимо этого, отработанная биомасса высших водных растений (биомасса, оставшаяся после получения энергии путем анаэробного сбраживания) может быть использована в качестве сельскохозяйственного удобрения в связи с высоким содержанием фосфора [29]. Таким образом, процесс получения биогаза из высших водных растений является не только экологически выгодным, но и экономически целесообразным.

Многие ученые изучали процесс анаэробного сбраживания высших водных растений [30-31]. Это связано с присутствием легко гидролизующихся сахаров, присутствующих в водных растениях, а также с низким содержанием целлюлозы и лигнина.

Для увеличения биогазового потенциала макрофитов многие исследователи применяют различные способы предварительной обработки высших водных растений, а именно:

- измельчение биомассы;
- паровая обработка (до 677 л биогаза/кг) [32];
- смешивание биомассы с навозом крупного рогатого скота (до 12 л биогаза при использовании соотношения 1:1) [33];
- автоклавирование биомассы при температуре 120°C (1 бар) в течение 30 минут (увеличение удельного выхода биогаза в 24 раза) [59];
- силосование с пшеничной соломой (в соотношении 70% макрофитов к 30% соломы) [34];
- щелочная термохимическая обработка (увеличение выхода биогаза на 66% по сравнению с выходом биогаза из необработанной биомассы) [35].

Однако, некоторые ученые указывают на низкий выход получаемого биогаза [36-37]. Одним из

недостатков, который обычно приписывают биомассе высших водных растений, является высокое содержание воды во многих макрофитах, что приводит к разбавлению дигестата, а также способствует низкому выходу биогаза при сбраживании свежей биомассы. Также существует сложность прогнозирования данного процесса, связанная с тем, что рост макрофитов непредсказуем. Рост высших водных растений зависит от местной экосистемы и, конечно, меняется в течение года [38]. Помимо этого, каждый вид высших водных растений содержит разное количество сухого вещества, влияющего на удельный выход биогаза [39].

Анализ научной литературы в области анаэробного сбраживания высших водных растений показал, что использование биомассы высших водных растений является привлекательным способом получения биогаза в связи с отсутствием конкуренции за земельные участки с сельскохозяйственным сектором. Во многих работах было отмечено положительное влияние различных методов предварительной обработки биомассы на удельный выход биогаза. Однако, имеются расхождения в количестве получаемого биогаза в различных исследованиях. Это можно объяснить различными условиями проведения экспериментов, а также различным качеством сбраживаемого субстрата. Также некоторые исследователи расходятся во мнении об энергетической эффективности использования макрофитов для получения биогаза. Но хочется отметить, что наибольшее количество ученых считают получение биогаза из высших водных растений выгодным и целесообразным.

На основании полученных данных была установлена необходимость в проведении собственных независимых исследований процесса анаэробного сбраживания высших водных растений с целью установления максимально возможного выхода метана, получаемого при этом процессе. При этом было решено использовать несколько типов предварительной обработки биомассы: измельчение биомассы, добавление инокулянта в виде коровьего навоза, так как в исследуемых источниках при использовании данных методов обработки были получены наилучшие результаты.

Таким образом, целью данного исследования является изучение процесса получения биогаза с высоким содержанием метана из высших водных растений. Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Проведение обширного обзора научной литературы, охватывающего аспекты роста высших водных растений, способности накопления различных элементов, преимущества и недостатки высшей водной растительности на водоемах, особенности их утилизации.
2. Постановка эксперимента по анаэробному сбраживанию высших водных растений.
3. Определение наибольшего процента содер-

жания метана в биогазе.

4. Определение наиболее эффективного соотношения композиционной смеси для сбраживания с использованием высших водных растений.

5. Изучение дальнейших перспектив использования полученного биогаза.

Методология. Исследования были выполнены с использованием уникальной в России экспериментальной установки под названием "Лабораторный комплекс для исследования процессов получения и преобразования биогазов из органических отходов". Данная установка соответ-

ствует современным международным стандартам по оборудованию и методикам применения. Автоматизированный комплекс позволяет оценивать потенциал производства биогаза из отходов, изучать динамику его образования и процессы очистки с выделением метановой компоненты до 95%.

Для выполнения сравнительного анализа воздействия количества и состава добавок при анаэробном сбраживании органических отходов была разработана лабораторная установка для получения биогаза (рис. 1), состоящая из термобокса, в котором размещаются биореакторы объемом 1 литр каждый.

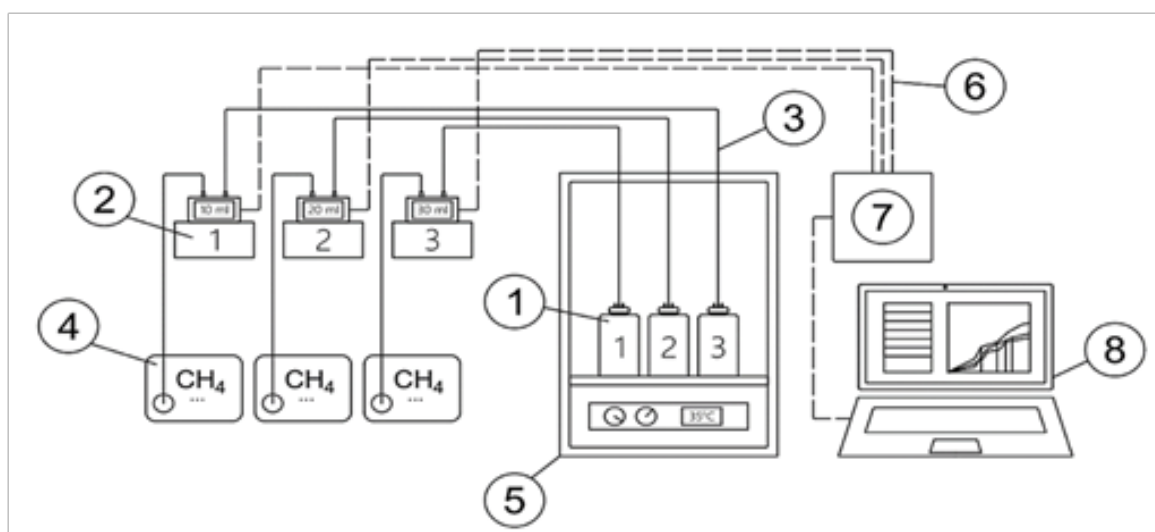


Рисунок 1 – Принципиальная схема лабораторной установки

На рисунке 1 представлены следующие цифровые обозначения: 1 – биореакторы; 2 – газовые счетчики; 3 – газовые линии; 4 – емкости для сбора биогаза; 5 – термобокс; 6 – сигнальные провода; 7 – блок управления газовыми счетчиками; 8 – информационно-аналитический комплекс.

Высшие водные растения собраны на Кавголово-ском озере (Ленинградская область), а также на Родниковом озере (г. Санкт-Петербург).

В качестве инокулянта используется свежий коровий навоз, отбираемый на ферме, содержание животных на которой соответствует санитарно-ветеринарным требованиям. В результате проведенного обзора научной литературы было установлено, что для получения наибольшего выхода биогаза необходимо провести предварительную обработку биомассы. Поэтому перед загрузкой высших водных растений в биореакторы они были измельчены в блендере, а затем смешаны с используемым

инокулянт.

Для расчета загружаемой массы в биореакторы были определены показатели влажности и содержание органического углерода в высших водных растениях и инокулянте (табл. 1).

Для определения оптимального соотношения высших водных растений и инокулянта для получения максимального содержания метана в биогазе были подготовлены различные смеси для закладки в биореакторы №1-8.

Композиционные смеси в разных пропорциях в пересчете на органический углерод загружали в биореакторы во влажном состоянии и снимали показатели по выходу биогаза в течение 45 суток (табл. 2). Общая масса загружаемых в биореакторы образцов, пересчете на органический углерод, составляла 8 г. Также было определено содержание сухого вещества и влажной навески в загружаемых компонентах в каждом биореакторе (табл. 3).

Таблица 1 – Характеристика компонентов (пищевых отходов, пивной дробины и инокулянта) перед загрузкой в биореакторы

Компонент	Влажность, %	Органический углерод, %
Высшие водные растения	94	93
Инокулянт	79	92

Таблица 2 – Содержание композиционных смесей в пересчете на органический углерод

Реактор №	Высшие водные растения, (г. орг. угл.)/%	Инокулянт, (г. орг. угл.)/%
1	4/50	4/50
2	4/50	4/50
3	6/75	2/25
4	6/75	2/25
5	2/25	6/75
6	2/25	6/75
7*	0/0	8/100
8*	8/100	0/0

*Контрольные биореакторы

Таблица 3 – Содержание сухого вещества и влажной навески в загружаемых компонентах

Реактор №	Высшие водные растения, г		Инокулянт, г	
	Содержание сухого вещества	Содержание влажной навески	Содержание сухого вещества	Содержание влажной навески
1	4,3	71,68	4,35	20,28
2	4,3	71,68	4,35	20,28
3	6,45	107,53	2,17	10,14
4	6,45	107,53	2,17	10,14
5	2,15	35,84	6,52	30,42
6	2,15	35,84	6,52	30,42
7*	0	0	8,7	40,56
8*	8,6	143,37	0	0

*Контрольные биореакторы

Результаты. Все замеры проводились с трехкратным повторением. Содержание метана в каждом из биореакторов представлено на рисунке 3.

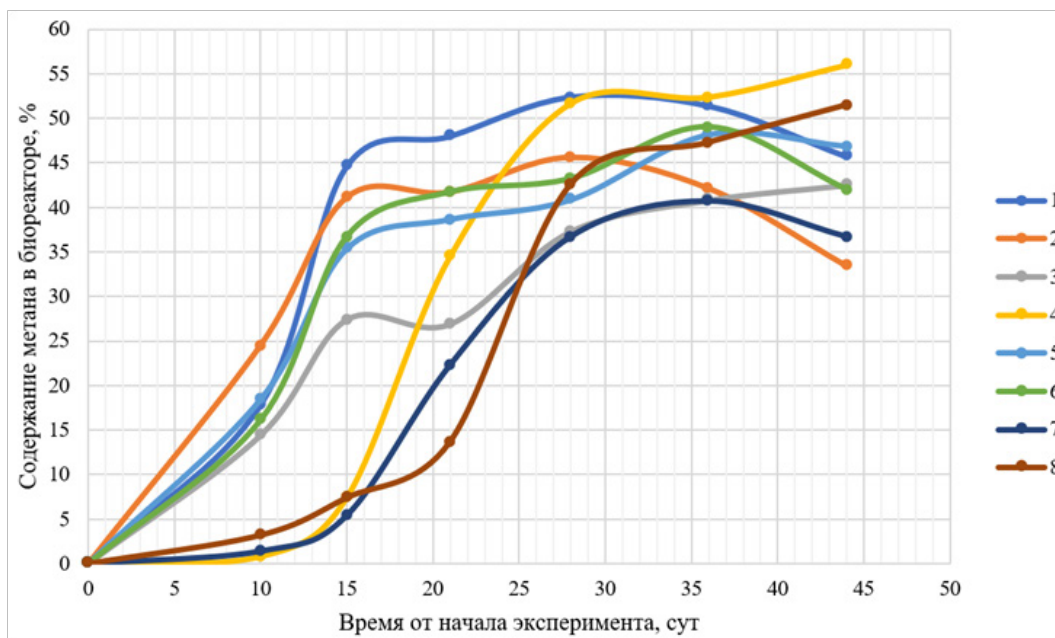


Рисунок 3 – Содержание метана в биореакторах, состав композиционных смесей биореакторов №1–8 соответствует данным из таблицы 2

Обсуждение. По полученным результатам (рис. 3), максимальный процент метана был зафиксирован в биореакторе №4 на 44 сутки от начала эксперимента – 56% метана в биогазе при соотношении биомассы высших водных растений к инокулянту: 75/25. Минимальный процент наблюдается в биореакторе №2–34% метана в биогазе при процентном

соотношении биомассы высших водных растений к инокулянту: 50/50 соответственно.

В остальных биореакторах значения метана на 44 сутки в процентном соотношении биомассы к инокулянту, соответственно, были следующими: в биореакторе №8–52% метана (100/0), в биореакторе №5–47% метана (25/75); в биореакторе №1–46%

метана (50/50); в биореакторе №3–43% метана (75/25); в биореакторе №6–42% метана (25/75); в биореакторе №7–37% метана (0/100).

В других исследованиях было выявлено, что макрофиты дают относительно высокий выход биогаза в зависимости от их происхождения [40]. Так, например, в работе P.R. Silva и др. было зафиксировано 60% метана на 40 день анаэробного сбраживания макрофитов [41]. Образцы западной водоросли (*E. nuttallii*) из пяти различных озер в Германии при анаэробном сбраживании показали выход 415–520 л биогаза/кг загруженной биомассы (ЗБ) макрофитов [42]. В общем, средний выход биогаза при анаэробном сбраживании высших водных растений в различных исследованиях варьируется от 200 л биогаза/кг ЗБ до 400 л биогаза/кг ЗБ [32,35].

В дальнейших исследованиях планируется более подробно изучить процесс получения биогаза из высших водных растений в установленном в данном эксперименте оптимальном процентном соотношении. Дальнейшие исследования будут направлены на определение количества получившегося в процессе сбраживания биогаза, а также возможное использование добавок для увеличения биогазового потенциала макрофитов.

Выводы. В работе проведено исследование по утилизации высших водных растений с целью получения биогаза. Были выявлены максимальный и минимальный процент метана в четвертом и втором биореакторах соответственно. Поскольку количество метана напрямую влияет на качество полученного биогаза, можно сделать вывод о том, что макрофиты в смеси с инокулянтom в следующем процентном соотношении: 75/25 соответственно являются эффективным композиционным составом для получения биогаза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Safonov A.V. et al. The Role of Phytoplankton in Self-Purification of Water Bodies with Radionuclide Pollutants //Radiochemistry. – 2022. – Т. 64. – №. 2. – С. 120-132.
2. Schaumburg J. et al. Macrophytes and phytobenthos as indicators of ecological status in German lakes – a contribution to the implementation of the Water Framework Directive //Limnologia. – 2004. – Т. 34. – №. 4. – С. 302-314.
3. Король В.М. Реагирование водных растений на химическое загрязнение воды. – 1985.
4. Францев А.В. О некоторых путях воздействия на жизнь пресных водоемов //Тр. Всесоюз. гидробиол. о-ва. – 1961. – Т. 11. – С. 323-330.
5. Якубовский К., Мережко А. Поглощение биогенных веществ высшими водными растениями как фактор предотвращения эвтрофирования водоемов //Антропогенное эвтрофирование водоемов. Черноголовка. – 1974. – С. 119-121.
6. Stake E. Higher vegetation and nitrogen in a rivulet in central Sweden //Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie. – 1967. – Т. 29. – С. 107-124.
7. Якубовский К.Б., Мережко А.И. Значение высших водных растений в формировании качества воды //Формирование и контроль качества поверхностных вод. – 1976. – №. 2. – С. 136.
8. Stake E. Higher vegetation and nitrogen in a rivulet in central Sweden //Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie. – 1967. – Т. 29. – С. 107-124.
9. Варенко Н.И., Чуйко В.Т. Роль высшей водной растительности в миграции марганца, цинка, меди и кобальта в Днепродзержинском водохранилище //Гидробиол. журн. – 1971. – Т. 7. – №. 3. – С. 54-56.
10. Мережко А.И. Эколого-физиологические особенности высших водных растений и их роль в формировании качества воды //М.: и их роль в формировании качества воды: Автореф. дисс. – 1978. – Т. 46.
11. Seidel K., Kickuth R. Exkretion von Phenol in der Phyllospähre von Scirpus lacustris L //Naturwissenschaften. – 1965. – Т. 52. – №. 18. – С. 517-517.
12. Seidel K. Reinigung von Gewässern durch höhere Pflanzen //Naturwissenschaften. – 1966. – Т. 53. – №. 12. – С. 289-297.
13. Кабанов Н.М. О химической и санитарно-биологической роли макрофитов в Клязьминском водохранилище //Тр. Всесоюз. гидробиол. о-ва. – 1961. – Т. 11. – С. 361-369.
14. Варенко Н.И., Чуйко В.Т. Роль высшей водной растительности в миграции марганца, цинка, меди и кобальта в Днепродзержинском водохранилище //Гидробиол. журн. – 1971. – Т. 7. – №. 3. – С. 54-56.
15. Брагинский Л.П., Кузьменко М.И., Карпезо Ю.И., Храпцов К.П. Эффективность применения гербицидов для борьбы с зарастанием каналов Краснознаменной оросительной системы. Мат-лы 2 респ. конф. Укр., фил. Всесоюз. геоботан. о-ва. К., 1970а, с. 12-14.
16. Соловьева В.В., Лапиров А.Г. 4.1. Криптогамные макрофиты вод //Гидробиотаника. – 2013. – С. 133-147.
17. Стрельникова А.П. Значение высшей водной растительности в формировании условий обитания сеголетков рыб, нагуливающих в прибрежье // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. – 2013. – №. 1. – С. 91-99.
18. Bauer, Aline & Moeller, Lucie & Wedwitschka, Harald & Stinner, Walter & Zehnsdorf, Andreas. (2018). Anaerobic digestion of mixed silage of waterweed biomass and wheat straw in a long-term semi-continuous biogas production process. Energy, Sustainability and Society. 8. 10.1186/s13705-017-0145-9.
19. Moeller, Lucie & Bauer, Aline & Wedwitschka, Harald & Stinner, Walter & Zehnsdorf, Andreas. (2018). Crop Characteristics of Aquatic Macrophytes for Use as a Substrate in Anaerobic Digestion Plants – A Study from Germany. Energies. 11. 3016. 10.3390/en11113016.
20. Wang Hongxing et al. Control strategies for overgrowth of large aquatic plants in lakes and reservoirs//Agricultural Environment and Development. – 2011. – Т. 28. – №. 2. – С. 69-71.
21. Opuszyński K. Use of phytophagous fish to control aquatic plants //Aquaculture. – 1972. – Т. 1. – С. 61-74.
22. M.J.C. Greer, A.S. Hicks, S.K. Crow, G.P. Closs. Effects of mechanical macrophytes control on suspended sediment concentrations in streams / New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research. 2017; 51(2):254-278. DOI:10.1080/00288330.2016.1210174.
23. Breckels R.D., Kilgour B.W. Aquatic herbicide applications for the control of aquatic plants in Canada: effects to nontarget aquatic organisms //Environmental Reviews. – 2018. – Т. 26. – №. 3. – С. 333-338.
24. Silva J.A. Wastewater Treatment and Reuse for Sustainable Water Resources Management: A Systematic Literature Review // Sustainability. – 2023. – Т. 15. – №. 14. – С. 10940.
25. Bauer, Aline & Moeller, Lucie & Wedwitschka, Harald & Stinner, Walter & Zehnsdorf, Andreas. (2018). Anaerobic digestion of mixed silage of waterweed biomass and wheat straw in a long-term semi-continuous biogas production process. Energy, Sustainability and Society. 8. 10.1186/s13705-017-0145-9.
26. Sharma S, Jha PK, Panwar A (2021) Production of bioethanol from wheat straw via optimization of co-culture conditions of *Bacillus licheniformis* and *Saccharomyces cerevisiae*. Discover Energy 1(1):1-8. <https://doi.org/10.1007/s43937-021-00004-4>.
27. Khan MAN, Shiekh Z, Parveen S, Ahmed S, Irfan M, Gauttam R, Shah AA, Jamal A, Khan S, Badshah M (2021) Production of bioethanol and biogas from *Spirodela polyrrhiza* in a biorefinery concept and output energy analysis of the process. Biomass Convers Biorefinery. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-02066-9>.
28. Greene JM, Gulden J, Wood G, Huesemann M, Quinn JC (2020) Techno-economic analysis and global warming potential of a novel offshore macroalgae biorefinery. Algal Res 51:102132. <https://doi.org/10.1016/j.agal.2020.102032>.
29. Stabenau, Nele & Zehnsdorf, Andreas & Röncke, Helmut

& Wedwitschka, Harald & Moeller, Lucie & Ibrahim, Bachar & Stinner, Walter. (2018). A potential phosphorous fertilizer for organic farming: recovery of phosphorous resources in the course of bioenergy production through anaerobic digestion of aquatic macrophytes. *Energy, Sustainability and Society*. 8. 10.1186/s13705-018-0155-2.

30. Evans Jason M., Wilkie Ann C. Life cycle assessment of nutrient remediation and bioenergy production potential from the harvest of hydrilla (*Hydrilla verticillata*). *Journal of Environmental Management*. 2010; 91(12):2626-2631.

31. Kulkarni M.B., Ghanegaonkar P.M. Pretreatment methods in anaerobic digestion for biogas generation: A review. *Int. J. New Innov. Eng. Technol*. 2015; 4:14-18.

32. Lizasoain, J.; Rincón, M.; Theuretzbacher, F.; Enguídanos, R.; Nielsen, P.J.; Potthast, A.; Zweckmair, T.; Gronauer, A.; Bauer, A. Biogas production from reed biomass: Effect of pretreatment using different steam explosion condition. *Biomass Bioenergy* 2016, 95, 84-91.

33. Yadav, D.; Barbora, L.; Bora, D.; Mitra, S.; Rangan, L.; Mahanta, P. An assessment of duckweed as a potential lignocellulosic feedstock for biogas production. *Int. Biodeterior. Biodegrad*. 2017, 119, 253-529.

34. Gaur, R.Z.; Khan, A.A.; Suthar, S. Effect of thermal pre-treatment on co-digestion of duckweed (*Lemna gibba*) and waste activated sludge on biogas production. *Chemosphere* 2017, 174, 754-763.

35. Koyama, M.; Yamamoto, S.; Ishikawa, K.; Ban, S.; Toda, T. Enhancing anaerobic digestibility of lignin-rich submerged macrophyte using thermochemical pre-treatment. *Biochem. Eng. J*. 2015, 99, 124-130.

36. Wilkie AC, Evans JM (2010) Aquatic plants: an opportunity feedstock in the age of bioenergy. *Biofuels* 1(2):311-321. <https://doi.org/10.4155/bfs.10.2>

37. Obata O, Ditchfeld A, Hatton A, Akunna J (2020) Investigating the impact of inoculum source on anaerobic digestion of various species of marine macroalgae. *Algal Res* 46:101-803. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.101803>

38. Herbes, Carsten & Brummer, Vasco & Roth, Sandra & Röhl, Markus. (2018). Using aquatic plant biomass from de-weeding in biogas processes – an economically viable option?. *Energy, Sustainability and Society*. 8. 10.1186/s13705-018-0163-2.

39. Zehnsdorf A, Moeller L, Stärk H-J et al (2017) The study of the variability of biomass from plants of the *Elodea* genus from a river in Germany over a period of two hydrological years for investigating their suitability for biogas production. *Energy. Sustain Soc* 7(1):1-7.

40. Zehnsdorf A, Korn U, Pröter J, Naumann D, Seirig M, Rönicke H, Pieper B (2011) Western waterweed (*Elodea nuttallii*) as a co-substrate for biogas plants. *Agric Eng* 66:136-139.

41. Silva, Paulo Roberto & Vieira, A. & Rodrigues, P. (2021). Evaluation of Biogas Production through Anaerobic Digestion of Aquatic Macrophytes in a Brazilian Reservoir. *Journal of Energy Research and Reviews*. 1-14. 10.9734/jenrr/2021/v7i130180.

42. Zehnsdorf, A.; Korn, U.; Pröter, J.; Naumann, D.; Seirig, M.; Rönicke, H.; Pieper, B. Western waterweed (*Elodea nuttallii*) as a co-substrate for biogas plants. *Agric. Eng.* 2011, 66, 136-39.

Статья поступила в редакцию 25.01.2024

Статья принята к публикации 15.03.2024

УДК 614.841.2.001.2

EDN: TOWNGO

**ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ОСТАТКОВ КАТОДА ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ
ПОСЛЕ ТЕПЛОВОГО РАЗГОНА ПРИ ЭКСПЕРТИЗЕ ПОЖАРОВ**

© Автор(ы) 2024

SPIN: 8987-0146

AuthorID: 984582

ORCID: 0000-0002-6630-4045

ScopusID: 57245729900

МОКРЯК Анна Васильевна, научный сотрудник отдела инновационных и информационных технологий в экспертизе пожаров Исследовательского центра экспертизы пожаров*Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы МЧС России
(193079, г. Санкт-Петербург, Октябрьская набережная, д. 35, e-mail: mokryakanna@mail.ru)*

SPIN: 4594-7726

AuthorID: 381920

ORCID: 0000-0002-5248-1534

ScopusID: 57202283870

МЕЛЬНИК Антон Анатольевич, кандидат технических наук, доцент,
начальник Научно-исследовательского института перспективных исследований и инновационных технологий
в области безопасности жизнедеятельности*Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы МЧС России
(193079, г. Санкт-Петербург, Октябрьская набережная, д. 35, e-mail: melnik@igps.ru)*

Аннотация. Литий-ионные аккумуляторы широко используются в электронных устройствах, электромобилях и стационарных системах хранения энергии. Существуют проблемы пожарной безопасности, связанные с литий-ионными элементами, поскольку высвобождение горячих легковоспламеняющихся газов из аккумулятора при высоких температурах может ускорить реакции горения, что приведет к возгоранию или взрыву его компонентов. В результате теплового разгона в аккумуляторе протекают физико-химические процессы, последствиями которых становятся специфические повреждения литий-ионного элемента. Одной из ключевых проблем при расследовании и экспертизе пожаров, связанных с возгоранием литий-ионных аккумуляторов, является выявления наличия (отсутствия) признаков теплового разгона аккумулятора по их сохранившимся остаткам. В статье «Анализ остатков литий-ионных аккумуляторов после теплового разгона методом сканирующей электронной микроскопии» приведены результаты исследования остатков анода, выполненного из медной фольги и корпуса, после теплового разгона аккумулятора. Данная статья является продолжением работы по выявлению следов и признаков теплового разгона в литий-ионных аккумуляторах и посвящена выявлению следов теплового разгона на остатках катода, материал которого представляет собой алюминиевую фольгу. Основным методом, используемый в данной публикации - сканирующая электронная микроскопия. Актуальность и практическая значимость работы связана с участвовавшими случаями возгорания литий-ионных аккумуляторов в быту и на электротранспорте.

Ключевые слова: катод, литий-ионный аккумулятор, экспертиза пожаров, тепловой разгон, сканирующая электронная микроскопия.

**EVALUATION OF THE STATE OF THE CATHODE REMAIN OF LITHIUM-ION BATTERIES AFTER
THERMAL RUNNING DURING EXAMINATION OF FIRE**

© The Author(s) 2024

MOKRYAK Anna Vasievna, researcher of the department of calculative methods and informational technologies in the fire expertise Fire Expertise Research Centre*Saint-Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia
(193079, St. Petersburg, Oktyabrskaya emb., 35, e-mail: mokryakanna@mail.ru)***MELNIK Anton Anatolyevich**, candidate of technical sciences, docent, head of the research institute for advanced studies and innovative technologies in the field of life safety*Saint-Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia
(193079, St. Petersburg, Oktyabrskaya emb., 35, e-mail: melnik@igps.ru)*

Abstract. Lithium-ion batteries are widely used in electronic devices, electric vehicles and stationary energy storage systems. There are fire safety problems associated with lithium-ion cells because the release of hot flammable gases from the battery, at high temperatures, can accelerate combustion reactions, leading to fire or explosion of its components. As a result of thermal acceleration, physical and chemical processes occur in the battery, the consequences of which are specific damage to the lithium-ion cell. One of the key problems in the investigation and examination of fires associated with the ignition of LIA is to identify the presence (absence) of signs of thermal acceleration of the battery by their preserved residues. In the article "Analysis of the remains of lithium-ion batteries after thermal acceleration by scanning

electron microscopy" [1], the results of the study of the remains of lithium-ion batteries after thermal acceleration by scanning electron microscopy are presented [1] presents the results of the study of the remains of the anode made of copper foil and the case after the thermal acceleration of the battery. This paper is a continuation of the work on the detection of traces and signs of thermal runaway in LIA, and is devoted to the detection of traces of thermal runaway on the remains of the cathode, the material of which is aluminum foil. The main method used in this publication is scanning electron microscopy. The relevance and practical significance of the work is related to the increasing number of cases of lithium-ion battery fires in households and electric transportation.

Keywords: cathode, lithium-ion battery, fire examination, thermal runaway, scanning electron microscopy.

Для цитирования: Мокряк А.В. Оценка состояния остатков катода литий-ионных аккумуляторов после теплового разгона при экспертизе пожаров / А.В. Мокряк, А.А. Мельник // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 1(65). – С. 127-134. – EDN: TOWNGO.

Введение. Спрос на литий-ионные аккумуляторы заметно вырос благодаря их высокой плотности энергии, высокому напряжению, компактным размерам и длительному циклу заряда-разряда [2-3, 9-11].

Основными функциональными компонентами литий-ионного аккумулятора являются сепаратор, электролит, отрицательный электрод (анод) и положительный электрод (катод).

В литий-ионных аккумуляторах сепаратор представляет собой тонкую перфорированную пленку, которая разделяет анод и катод в аккумуляторе. Он предотвращает короткое замыкание между двумя электродами, обеспечивая безопасное функционирование аккумулятора. Сепаратор также позволяет ионам лития проходить между электродами, обеспечивая процесс зарядки и разрядки аккумулятора.

Электролит в литий-ионном аккумуляторе представляет собой вещество, обеспечивающее проводимость ионов лития между анодом и катодом в аккумуляторе. Это позволяет ионам лития перемещаться внутри аккумулятора во время зарядки и разрядки. Электролит также играет ключевую роль в обеспечении безопасной работы аккумулятора.

Отрицательный электрод (анод) в литий-ионных аккумуляторах обычно состоит из меди или медных сплавов. Медь является хорошим проводником электричества и имеет высокую стойкость к коррозии, что делает ее подходящим материалом для токосъемника в литий-ионных аккумуляторах. На анод нанесена углеродная матрица с внедренными ионами лития, которая образует структуру литий углерод 6 – LiC_6 . В процессе заряда аккумулятора медный токосъемник служит для сбора электрического заряда, который выделяется в результате химических реакций внутри аккумулятора.

Положительный электрод (катод) в литий-ионных аккумуляторах обычно состоит из фольги алюминиевого сплава, на которую нанесен активный материал, в зависимости от типа используемых элементов это может быть: $LiCoO_2$ (распространен в ноутбуках), $LiMn_2O_4$ (применяются в портативной электронике, электроинструментах, электромобилях и энергетических системах для дома и офиса), $Li(NiCoMn)O_2$ (распространен в фонарях, электроинструментах, мобильных устройствах), $LiFePO_4$ (распространен в солнечных панелях, телекоммуникационном оборудовании,

инструментах, электрических транспортных средств, портативных пуско-зарядных устройствах) и $Li(NiCoAl)O_2$ (применяется в электротранспорте, включая гироскутеры, электросамокаты, электровелосипеды и электромобили). Будучи относительно легким, хорошо проводящим, механически прочным и электрохимически стабильным, алюминий является предпочтительным для производства литий-ионных аккумуляторов с высокой плотностью энергии. Электрохимическая стабильность алюминия обусловлена наличием тонкого ($\approx 5-20$ нм) непористого естественного защитного слоя, который состоит в основном из оксида алюминия Al_2O_3 и следов гидроксида алюминия $Al(OH)_3$. Этот слой очень быстро образуется в воздушной среде после изготовления алюминиевой фольги и обеспечивает высокую коррозионную стойкость токосъемника примерно до 3,8 В. Однако ограниченная площадь контакта, слабая адгезия с электродными материалами и коррозия под действием электролита, при длительном циклировании, ухудшает электрохимические характеристики литий-ионных аккумуляторов. Так же катоды из алюминия страдают естественного слоя оксида алюминия во время циклов, что приводит к быстрому снижению емкости батареи. Дефекты катодного покрытия могут привести к ряду проблем в работе литий-ионных аккумуляторов. Например, если покрытие катода нарушено, то может произойти короткое замыкание между катодом и анодом, что может привести к перегреву и возгоранию аккумулятора. Кроме того, дефекты покрытия могут привести к утечке электролита, что также может привести к выходу из строя ячейки и как показали исследования, направленные на изучение теплового разгона, тепловые выбросы, как правило, происходят на алюминиевом катоде [4, 6-8].

Тепловой разгон литий-ионного аккумулятора является серьезной проблемой. Из-за химических реакций, которые происходят внутри аккумулятора в результате теплового разгона, происходит выделение газов и повышение давления внутри аккумулятора. Если давление становится слишком высоким, аккумулятор может взорваться и привести к пожару. Поэтому расследование пожаров, связанных с литий-ионными аккумуляторами, является очень важной проблемой, которая требует исследований [5,12-14].

Методология. Экспериментальные материалы:

литий-ионные аккумуляторные батареи типа «18650» емкостью 3000 мАч, номинальным напряжением 3,7 В.

Для измерения заряда аккумуляторной батареи использовался зарядное устройство с контролем заряда. Затем батарея была разряжена до желаемого состояния заряда при постоянном токе и постоянном напряжении. В данном исследовании использовались три различных состояния заряда, а именно 25%, 50% и 100%.

Экспериментальное оборудование:

- зарядное устройство с контролем заряда;
- муфельная печь;
- сканирующий электронный микроскоп *Tescan VEGA\\XMU* с вольфрамовым катодом и высоким вакуумом в камере с системой энергодисперсионного микроанализа *Inca Energy 350* и детектором *X-MAX 80* с площадью кристалла 80 мм². Для определения химического состава использовался рентгенофлуоресцентный метод (РФА). [15-16].

При проведении исследований методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) остатки алюминиевой фольги пробоподготовке не подверга-

лись.

Результаты. В результате экспериментального моделирования теплового разгона литий-ионных аккумуляторов при заряде 25% при достижения температуры ~90°C происходило повреждение предохранительного клапана с выбросом газов, при достижении температуры ~120°C произошёл хлопок, сопровождающийся форсом пламени, корпус остался цел, за исключением появления шарообразных оплавлений из алюминия на предохранительном клапане, разлета содержимого литий-ионной батареи не произошло. При заряде аккумуляторов на 50% в результате достижения температуры ~ 110°C искры были выброшены из сопла предохранительного клапана. После исчезновения искр батарея продолжала выпускать очень густой белый дым, который постепенно уменьшался, затем произошёл разлет внутренних составляющих батареи. При заряде аккумулятора на 100% при достижении температуры ~ 130°C батарея показала более интенсивную тепловую и пожарную реакцию, батарея быстро расширялась затем произошёл взрыв и последовал разлет внутренних составляющих батареи (рис. 1).



а



б



в

Рисунок 1 – Последствия теплового разгона литий-ионного аккумулятора:
а – 25% заряд батареи; б – 50% заряд батареи; в – 100% заряд батареи

Для исследования последствий теплового разгона были отобраны шарообразные частицы алюминия и алюминиевая фольга (рис. 2) с целью анализа микроструктуры материала, чтобы определить наличие дефектов и изменений структуры, вызванных тепловым разгоном.

В результате теплового разгона при заряде аккумулятора на 25%, алюминий практически полностью вытек через предохранительный клапан. Микроструктура алюминия в основном состоит из мелких рекристаллизованных частиц и имеет ячеистую форму (рис. 3).

При заряде аккумулятора на 50 и 100%, при тепловом разгоне, алюминиевая фольга литий-

ионного аккумулятора сохранилась, но претерпела такие повреждения, как плавление (рис. 4, 5). Степень повреждения алюминиевой фольги показала зависимость от процента заряда, чем больше процент заряда, тем больше площадь плавления в зоне повреждения.

При повышении температуры происходит увеличение энергии молекул, в результате чего атомы начинают двигаться быстрее и разрушается кристаллическая структура материала. Средний химический состав различных участков поверхности алюминия показал уменьшение процентного количества алюминия в следствии его окисления при тепловом разгоне (табл. 1).

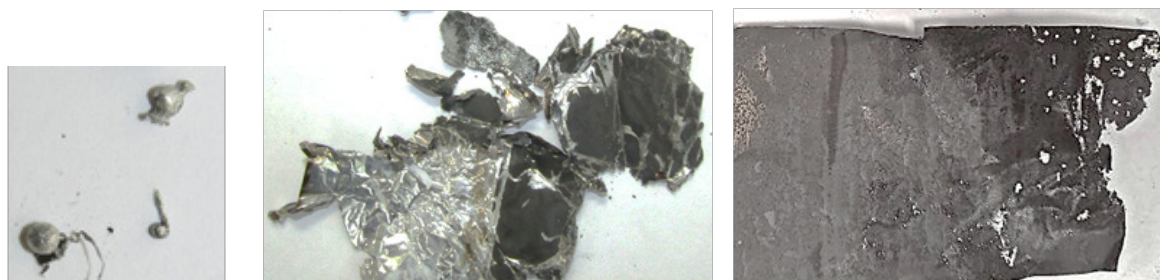


Рисунок 2 – Остатки катода из алюминиевой фольги после теплового разгона литий-ионного аккумулятора:
а – 25% заряд батареи; б – 50% заряд батареи; в – 100% заряд батареи

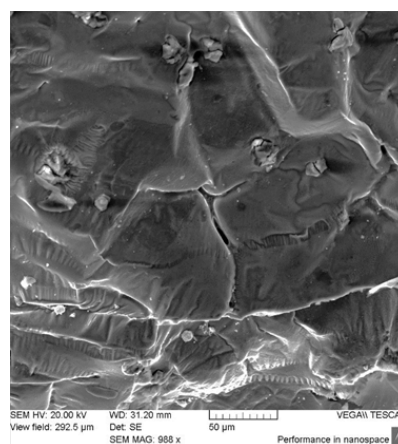
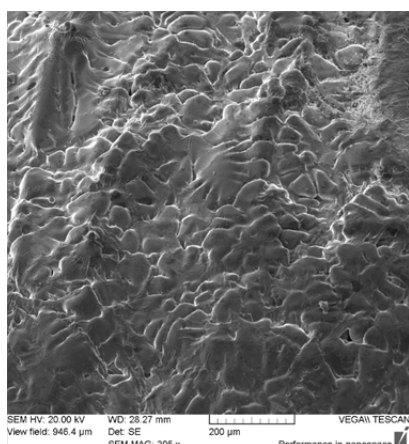


Рисунок 3 – Морфология поверхности на шарообразных алюминиевых оплавлениях после теплового разгона литий-ионного аккумулятора при 25% заряде батареи

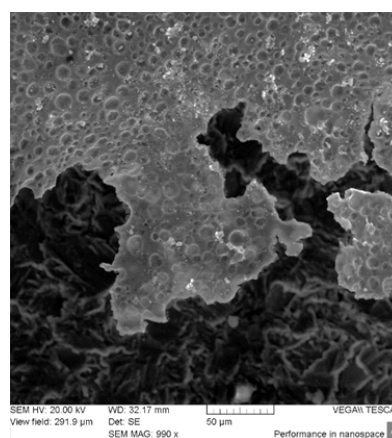
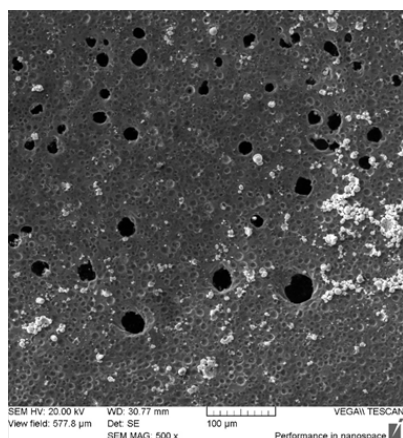


Рисунок 4 – Морфология поверхности на алюминиевой фольге после теплового разгона литий-ионного аккумулятора при 50% заряде батареи

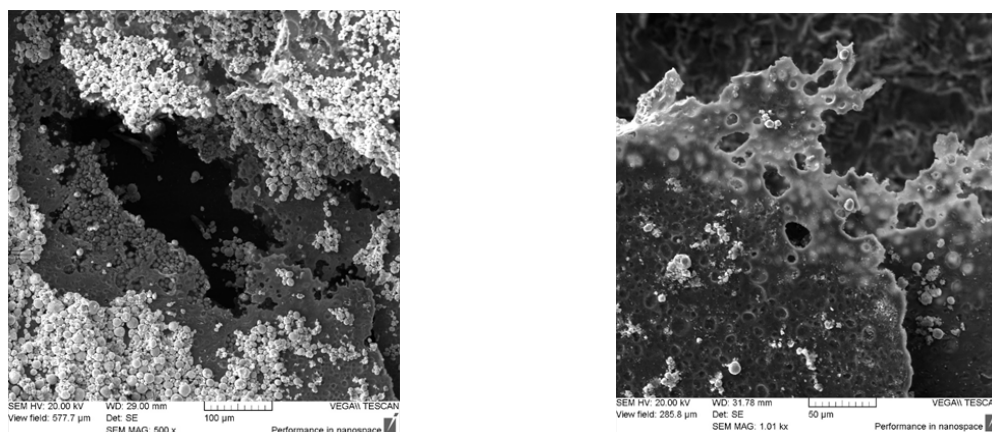


Рисунок 5 – Морфология поверхности на алюминиевой фольге после теплового разгона литий-ионного аккумулятора при 100% заряд батареи

Таблица 1 – Средний химический состав различных участков поверхности остатков катода из алюминия литий-ионных аккумуляторов после теплового разгона

№	Химический состав, % весовой							
	C	O	F	Al	Mn	Fe	Co	Ni
25 % заряда	9,10	7,78	4,47	74,04	0,41	0,80	0,59	3,01
50 % заряда	4,56	16,38	4,58	71,45	0,19	0,64	-	2,20
100 % заряда	19,67	5,73	1,38	66,88	0,79	-	4,42	1,12

*«-» – химический элемент не обнаружен

Исследование остатков катода из алюминиевой фольги показало, что на ее поверхности обнаружены частицы шарообразной формы, которые представляет собой активный материал, наблюдается его отслоение, их средний размер составляет: 9~13мкм (рис. 6).

Отслоение активного материала от алюминиевой фольги при тепловом разгоне аккумулятора может происходить по нескольким причинам. Одна из них – это термическое расширение материалов, из которых состоит аккумулятор. Кроме того, повышенная температура может вызвать окисление металла, что также может привести к разрушению аккумулятора.

На основании полученных данных химического анализа, можно сказать, что шарообразные частицы обнаруженные на поверхности алюминия, состоят из никеля, марганца, кобальта и кислорода и представляют собой $Li(NiCoMn)O_2$, активный материал, который нанесен на алюминиевую фольгу (табл. 2).

Случай из практики расследования пожара, связанного с литий-ионными аккумуляторами.

Аккумуляторы, являющиеся частью электроколеса, были приобретены отдельно от колеса и велосипеда. Аккумуляторы крепились на раме в велосипедной сумке, обмотанной изолентой. Предположительно в одном из аккумуляторов возникло явление теплового разгона. Далее вследствие развития высоких температур, вызванных, механическим повреждением аккумулятора или попаданием воды из окружающей среды, по цепочке тепловой разгон передался на последующие аккумуляторы, которые вероятнее всего находились в сборке батареи.

Обнаруженные на предохранительном клапане литий-ионного аккумулятора шарообразные оплавления из алюминия могут указывать на высокую температуру внутри аккумулятора, которая превышает предельные значения вследствие теплового разгона (рис. 7, 8).

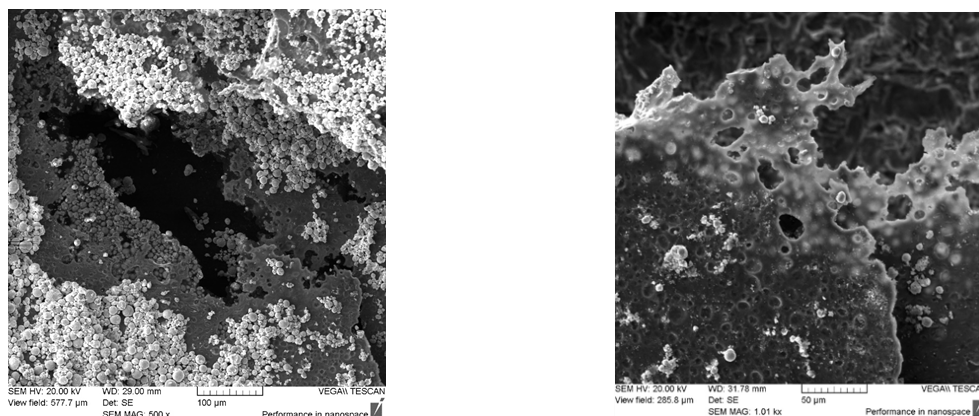


Рисунок 6 – Морфология и средний размер шарообразных частиц на алюминиевой фольге после теплового разгона литий-ионного аккумулятора: а – 50 % заряд батареи, б – 100% заряд батареи

Таблица 2 – Средний химический состав шарообразных частиц с поверхности остатков алюминиевой фольги литий-ионных аккумуляторов после теплового разгона

№	Химический состав, % весовой								
	C	O	F	Al	P	Mn	Fe	Co	Ni
50 % заряда	8,83	20,09	12,50	0,80	0,75	5,25	-	6,43	45,36
100 % заряда	14,40	29,98	-	-	-	4,56	2,58	5,81	42,66

*«-» – химический элемент не обнаружен

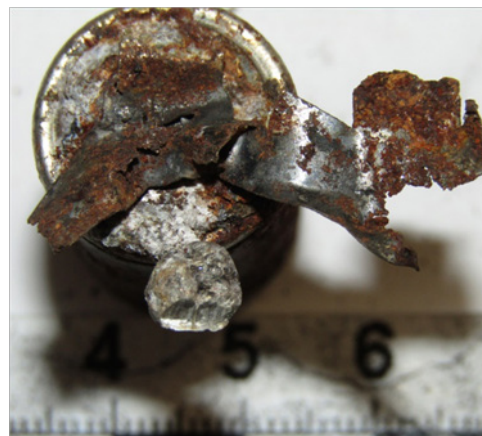


Рисунок 7 – Повреждения обнаруженные на фрагменте литий – ионного аккумулятора после пожара

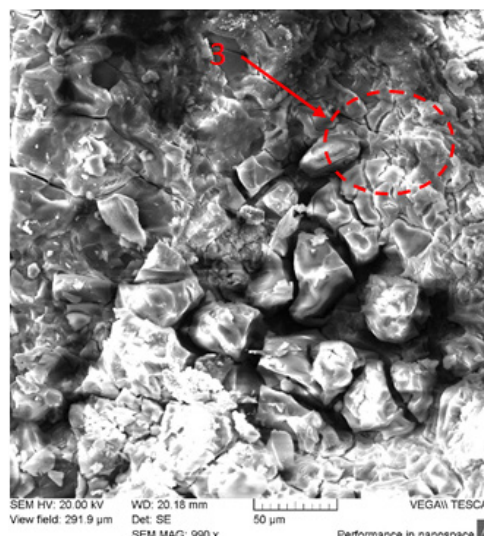
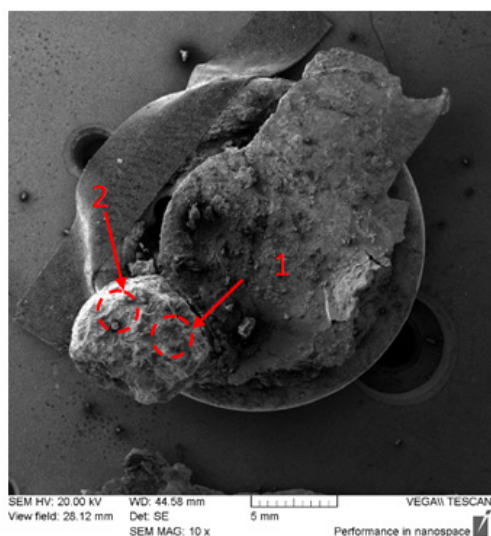


Рисунок 8 – Морфология поверхности шарообразных алюминиевых оплавлений, SE-изображения. Пунктиром выделена область химического анализа и указан ее порядковый номер

Таблица 3 – Средний химический состав различных участков поверхности остатка катода из алюминия литий-ионного аккумулятора после теплового разгона пожара

№ участка анализа	Химический состав, % весовой							
	C	O	F	Al	Mn	Fe	Co	Ni
1	12,37	10,65	-	72,09	0,31	0,76	0,65	3,17
2	8,8	12,54	2,8	72,83	0,12	0,48	-	2,43
3	11,77	11,96	-	74,27	0,19	-	0,42	1,39

*«-» – химический элемент не обнаружен

На основании сканирующей электронной микроскопии установлено, что обнаруженное на предохранительном клапане шарообразное оплавление состоит из алюминиевого сплава (табл. 3) и является положительный электродом (катодом).

Микроструктура алюминия имеет ячеистую форму. Эти данные схожи с данными, которые были получены в ходе эксперимента, из чего можно предположить, что повреждения данного аккумулятора произошли вследствие теплового разгона и он был

заряжен примерно на 25%. Обнаружены никель, кобальт и марганец. Данные элементы входят в состав материалов, из которых изготавливается активный материал, который нанесен на катод, а именно слоистые оксиды лития – $LiCoO_2$, $LiMn_2O_4$, $Li(Ni_xMn_yCo_z)O_2$. Свойства катода $Li(NiCoMn)O_2$ зависят от соотношения атомов Ni , Co и Mn в оксиде. Как правило, $Li(NiCoMn)O_2$ с высоким содержанием Ni имеют высокую электрическую емкость, но пониженную термическую стабильность.

Обсуждение. Повреждение оболочки аккумуляторов происходит из-за увеличения внутреннего давления в аккумуляторе, вызванное выделением газов в результате химических реакций, происходящих внутри него. Кроме того, высокие температуры, которые возникали при тепловом разгоне, приводят к плавлению и деформации всех материалов аккумулятора.

Обнаружено, что чем больше % заряда аккумулятора, тем больше сохранность алюминиевой фольги, так при 25% заряда, алюминия практически весь «вытек» через предохранительный клапан.

Микроструктура алюминия при 25% заряда в основном состоит из мелких рекристаллизованных частиц и имеет ячеистую форму.

При 50% и 100% заряда алюминиевая фольга литий-ионного аккумулятора претерпевает такие повреждения, как плавление. Степень повреждения алюминиевой фольги, показала зависимость от процента заряда, чем больше процент заряда, тем больше площадь плавления в зоне повреждения. Причина возникновения этих повреждений связана с тем, что алюминиевая фольга в литий-ионном аккумуляторе используется в качестве коллектора тока и оболочки для электродов и в результате повышения температуры происходит изменение физических свойств материала.

При повышении температуры происходит увеличение энергии молекул, в результате чего атомы начинают двигаться быстрее и разрушается кристаллическая структура материала. Средний химический состав различных участков поверхности алюминия показал уменьшение процентного количества алюминия в следствии его окисления при тепловом разгоне.

Выводы. В данной статье проведен анализ остатков алюминия из которого изготавливается положительный электрод (катод) литий-ионного аккумулятора методом сканирующей электронной микроскопии и рентгенофлуоресцентным методом с целью поиска следов теплового разгона. Эксперимент показал, что из-за разного состояния заряда остаточные следовые характеристики объектов разные.

В реакциях при тепловом разгоне доминируют состояние заряда аккумулятора, чем выше процент заряда литий-ионного аккумулятора, тем выше температура при которой происходит тепловой разгон. Это связано с тем, что при зарядке литий-ионного

аккумулятора происходит накопление энергии в виде химической энергии, которая преобразуется в электрическую энергию. По мере увеличения процента заряда аккумулятора, уровень энергии в нем также возрастает.

Когда аккумулятор находится на высоком уровне заряда, это может привести к тому, что при тепловом разгоне большая часть энергии начнет превращаться в тепловую энергию из-за ограничений вместимости аккумулятора, и как следствие этого, чем больше процент заряда, тем больше степень повреждения корпуса, но больше сохранность алюминиевой фольги. Так при заряде аккумулятора на 25%, алюминий «вытек» через предохранительный клапан образовав шарообразные оплавления.

Сравнивая СЭМ-морфологию материалов остатков батареи с различной степенью заряда обнаружено, что при тепловом разгоне на алюминиевой фольге образуются следующие признаки: отслоение активного материала от алюминиевой фольги, плавление алюминиевой фольги и уменьшение процентного количества алюминия.

Результат химического анализа, обнаруженных шарообразных частиц на поверхности алюминиевой фольги, показал, что они состоят из никеля, марганца, кобальта и кислорода и представляют собой $Li(NiCoMn)O_2$, активный материал, который нанесен на алюминиевую фольгу.

Полученные данные, в результате исследования остатков алюминиевой фольги, можно использовать при расследовании пожаров связанных с литий-ионными аккумуляторами для определения наличия (отсутствия) признаков теплового разгона, данные химического анализа можно использовать для определения типа активного материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. А.В. Мокряк, А.Ю. Мокряк, А.А. Мельник Анализ остатков литий-ионных аккумуляторов после теплового разгона методом сканирующей электронной микроскопии // Международный научно-исследовательский журнал. – 2023. – № 4(130). – DOI 10.23670/IRJ.2023.130.63.
2. Плотников В.Г., Чешко И.Д., Кондратьев С.А. Пожарная опасность литий-ионных аккумуляторов и низковольтных источников питания на их основе // Расследования пожаров. – 2014. – Вып. 4. – С. 53-58. EDN: YKLJZP.
3. Q. Wang, B. Mao, S.I. Stoliarov, J. Sun A review of lithium ion battery failure mechanisms and fire prevention strategies Prog. Energy. Combust. Sci., 73 (2019). – P. 95-131. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2019.03.002>.
4. Скундин А.М., Ефимов О.Н., Ярмоленко О.В. Современное состояние и перспективы развития исследований литиевых аккумуляторов // Успехи химии. – 2002. – Т.71. – №4. – С. 329-346. <https://doi.org/10.1070/RC2002v-071n04ABEH000706>.
5. Shahid S., Agelin-Chaab M. A review of thermal runaway prevention and mitigation strategies for lithium-ion batteries. Energy Conversion and Management: X. 16. 100310. – (2022). <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100310>.
6. Смелков Г.И., Пехотиков В.А., Рябиков А.И., Назаров А.А. К вопросу о пожарной опасности аккумуляторных батарей // Безопасность труда в промышленности. – 2020. – № 5. – С. 56-62. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2020-5-56-62>. EDN: UHLBBV.
7. Мельник А.А., Елисеев Ю.Н., Мокряк А.В. Основные факторы, провоцирующие пожарную опасность литий-

ионных аккумуляторов / Техносферная безопасность. – 2021. – № 2 (31). – С. 113-116. EDN: OSVCKS.

8. Мельник А.А., Елисеев Ю.Н., Мокряк А.В., Иванов Д.В. Обзор огнетушащих средств при тушении литий-ионных батарей / Сибирский пожарно-спасательный вестник. – 2021. – № 2(21). – С. 33-35. – DOI 10.34987/vestnik.sibpsa.2021.30.61.006.

9. Мокряк А.В. Тепловой разгон и возгорание литий-ионного аккумулятора электромобиля / А.В. Мокряк // Вопросы науки. – 2022. – № 2. – С. 56-59.

10. Мокряк, А.В. Обзор призматических и цилиндрических литий-ионных аккумуляторов / А.В. Мокряк // Вопросы науки. – 2022. – № 2. – С. 60-64.

11. Dan Deng, Jialu Qiao, Jun Qi, Shunli Wang, Siyu Jin, Xianrong Xiao, Xueyi Hao, Yunlong Shang, Chapter 6 - Equivalent modeling and parameter identification of power lithium-ion batteries, Editor(s): Shunli Wang, Kailong Liu, Yujie Wang, Daniel-Ioan Stroe, Carlos Fernandez, Josep M. Guerrero, State Estimation Strategies in Lithium-ion Battery Management Systems, Elsevier, 2023, Pages 95-124, ISBN 9780443161605, <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-16160-5.00001>

12. Mao B., Huang P., Chen H., Wang Q., Sun J. Self-heating reaction and thermal runaway criticality of the lithium ion battery. International Journal of Heat and Mass Transfer. 149. – 119178. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119178>.

13. Chen M., Ouyang D., Cao S., Liu J., Wang Z., Wang J. Effects of heat treatment and SOC on fire behaviors of lithium-ion batteries pack. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 136. – (2018). <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7864-9>.

14. Юнчиц В.М., Балобан А.П. Некоторых вопросах исследования литий-ионных аккумуляторных батарей при проведении пожарно-технической экспертизы // Судебная Экспертиза Беларуси. – 2021. – Вып.: 2 (13). – С. 68-74. EDN: NESMIW.

15. Уманский Я.С. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия. М.: Металлургия, 1982. – С. 632.

16. Криштал М.М., Ясников И.С., Полунин В.И., Филатов А.М., Ульяенков А.Г. Сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ в примерах практического применения: Москва. Техносфера, 2009. – 208 с. EDN: PCAVBZ.

Статья поступила в редакцию 02.02.2024

Статья принята к публикации 15.03.2024

УДК 331.451

EDN: PUIUGI

**ЭКСПЕРТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ОКАЗЫВАЮЩИХ НАИБОЛЬШЕЕ ВЛИЯНИЕ НА
БЕЗОПАСНОСТЬ ТРУДА В ПУТЕВОМ КОМПЛЕКСЕ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ**

© Автор(ы) 2024

SPIN: 7057-8680

Author ID: 184442

ORCID: 0009-0008-1015-1327

Scopus ID: 57211031005

НАВЦЕНЯ Владимир Юрьевич, доктор технических наук, профессор,
кафедра «Управление безопасностью в техносфере»*Российский университет транспорта**(127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9, e-mail: Navtsenya@tvttower.ru)*

SPIN: 2874-8742

Author ID: 989099

ORCID: 0000-0002-9666-2265

Researcher ID: IXD-5143-2023

Scopus ID: 6508058913

НАРУСОВА Елена Юрьевна, кандидат технических наук, доцент,
кафедра «Управление безопасностью в техносфере»*Российский университет транспорта**(127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9, e-mail: e.narusova@ubt-rut-miit.ru)*

SPIN: 9889-6530

Author ID: 721105

ORCID: 0000-0002-9830-9588

Researcher ID: N-9715-2018

Scopus ID: 57211197820

КОРОЛЕВА Анна Михайловна, кандидат технических наук, доцент,
кафедра «Управление безопасностью в техносфере»*Российский университет транспорта**(127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9, e-mail: a.koroleva@ubt-rut-miit.ru)*

Аннотация. Статья посвящена вопросам обеспечения безопасности труда на железнодорожном транспорте. Констатируется, что на протяжении ряда лет в Российской Федерации наблюдается улучшение ситуации в сфере охраны труда в результате целенаправленной государственной политики. Отмечается, что для достижения цели «нулевого травматизма» необходимо развитие культуры безопасности. Описывается проведенное в путевом комплексе ОАО «РЖД» исследование производственных факторов экспертным методом. Анализируются результаты опроса экспертов. Высказывается мнение о целесообразности проведения исследований с привлечением в качестве экспертов работников компании, что не только позволит изучить условия труда, но и будет способствовать развитию культуры безопасности, поскольку увеличивает вовлеченность персонала в деятельность по повышению безопасности труда. Итоги ранжирования показывают преобладание мнения об опасности воздействия подвижного состава, а также о влиянии работы в условиях недостаточной естественной освещенности и повышенного уровня шума, что оказывает не только вредное воздействие на здоровье работника, но и увеличивает опасность наезда. Делается вывод, что при осознании степени опасности и вредности различных производственных факторов работники не всегда применяют адекватные меры безопасности, в связи с чем необходимо развивать культуру безопасности, в частности, повышать степень вовлеченности персонала.

Ключевые слова: безопасность труда, культура безопасности, вредные и опасные производственные факторы, вовлеченность персонала, экспертный метод, метод рангов.

**EXPERT STUDY OF FACTORS HAVING THE GREATEST INFLUENCE ON
OCCUPATIONAL SAFETY IN THE RAILWAY TRACK COMPLEX**

© The Author(s) 2024

NAVTSENYA Vladimir Yurievich, doctor of technical sciences, professor,
department "Management of safety in a technosphere"*Russian University of Transport**(127994, Russia, Moscow, Obraztsov St. 9, building 9, e-mail: Navtsenya@tvttower.ru)***NARUSOVA Elena Yurievna**, candidate of technical sciences, associate professor,
department "Management of safety in a technosphere"*Russian University of Transport**(127994, Russia, Moscow, Obraztsov St. 9, building 9, e-mail: e.narusova@ubt-rut-miit.ru)*

KOROLEVA Anna Mikhailovna, candidate of technical sciences, associate professor,
department "Management of safety in a technosphere"

Russian University of Transport

(127994, Russia, Moscow, Obraztsov St. 9, building 9, e-mail: a.koroleva@ubt-rut-miit.ru)

Abstract. The article is devoted to the issues of ensuring labor safety in railway transport. It is stated that over the course of a number of years in the Russian Federation there has been an improvement in the situation in the field of labor protection as a result of targeted state policy. It is noted that to achieve the goal of "zero injuries" it is necessary to develop a safety culture. The study of production factors carried out in the track complex of JSC Russian Railways using the expert method is described. The results of a survey of experts are analyzed. An opinion is expressed on the advisability of conducting research with the involvement of company employees as experts, which will not only allow studying working conditions, but will also contribute to the development of a safety culture, since it increases the involvement of personnel in activities to improve occupational safety. The ranking results show the predominance of opinions about the danger of exposure to rolling stock, as well as the impact of working in conditions of insufficient natural light and increased noise levels, which not only has a harmful effect on the health of the worker, but also increases the risk of a collision. It is concluded that, when aware of the degree of danger and harmfulness of various production factors, workers do not always apply adequate safety measures, and therefore it is necessary to develop a safety culture, in particular, to increase the degree of staff involvement.

Keywords: labor safety, safety culture, harmful and dangerous production factors, personnel involvement. expert method, rank method.

Для цитирования: Навценя В.Ю. Экспертное исследование факторов, оказывающих наибольшее влияние на безопасность труда в путевом комплексе железных дорог / В.Ю. Навценя, Е.Ю. Нарусова, А.М. Королева // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 1(65). – С. 135-139. – EDN: PUIUGI.

Введение. Анализ статистических данных показывает, что в Российской Федерации в целом наблюдается устойчивая тенденция к снижению уровня производственного травматизма. За период 2010-2022гг. численность травмированных на производстве снизилась с 48 тыс. человек до 20 тыс. человек в год, при этом численность пострадавших со смертельным исходом уменьшилась с 2004 человек до 999 человек в год. Положительная динамика в обеспечении повышения безопасности труда подтверждается и соответствующими показателями уровня травматизма, рассчитанными на 1000 человек, работающих: за тот же период, этот показатель снизился с 0,094 чел. до 0,049 чел. [1]. Безусловно, это результат государственной политики, направленной на достижение цели концепции «нулевого травматизма» за счет повышения значения охраны труда в обществе, внедрения культуры безопасности и развития безопасных технологий производственных процессов, что отражается, в частности, в увеличении объема финансирования мероприятий по охране труда в расчете на 1 работающего с 8758,1 руб. в 2012г. до 21997,0 руб. в 2022г. [1-3].

Важной задачей, от решения которой зависит социально-экономическое развитие общества и качество жизни работников, является снижение профессиональной заболеваемости. К отраслям с наибольшим количеством рабочих мест с вредными условиями труда относятся добывающая, химическая, металлургическая, строительная отрасли [4]. Велика доля рабочих мест с вредными условиями труда на железнодорожном транспорте: насчитывается около 75 тыс. рабочих мест с вредными, причём, неустраняемыми факторами [5]. Следует отметить, что несмотря на то, что невозможно полностью устранить

воздействие вредных факторов на работников, однако, условия труда можно улучшить. Так, в ОАО «РЖД» за 2022 г. были улучшены условия труда более, чем на 43 тыс. рабочих местах [5].

Система управления охраной труда в ОАО «РЖД» включает три направления: нормативное обеспечение, обучение персонала и создание безопасных условий труда [6]. Деятельность по обеспечению безопасности труда основывается на развитии культуры безопасности, признаками которой являются управляемость, обмен информацией, вовлеченность персонала, культура изучения проблем и отношение к возложению вины [7-11].

Профессиональная деятельность работников путевого комплекса железных дорог осуществляется непосредственно в зоне движения поездов, то есть в зоне повышенной опасности [12]. Изучению условий труда и различных производственных факторов, воздействующих на монтеров пути, посвящены работы многих исследователей [13-19]. Однако, рабочие места в путевом хозяйстве всё ещё можно отнести к одним из наиболее травмоопасных на железной дороге, поэтому необходимы мероприятия по повышению безопасности технологических процессов, совершенствованию средств индивидуальной защиты, улучшению условий труда.

Методология. Цель исследования: повышение безопасности труда монтера пути на основе изучения производственных факторов, воздействующих на него в процессе трудовой деятельности. В качестве метода исследования был выбран экспертный метод, который, наряду с получением необходимой информации, способствует привлечению внимания работников к вопросам охраны труда. Эксперты выбирались с учетом их опыта работы по данной профессии. Всего в

опросе в качестве экспертов участвовали 15 опытных работников – монтеров пути.

Для проведения исследования была разработана анкета, содержащая перечень вредных производственных факторов, которые надо было оценить с точки зрения степени воздействия на работника, присвоив каждому из них определенный ранг, соответствующий их значимости, по мнению эксперта.

Фактору, оказывающему наибольшее вредное влияние на работника, присваивается ранг 1, затем, по мере убывания степени влияния присваиваются соответствующие ранги. Если факторы оказывают одинаковое воздействие, им могут быть присвоены одинаковые ранги. Поскольку человеку проще ответить на вопрос, подразумевающий оценку «больше-

меньше», вопросы сформулированы так, чтобы была возможна не количественная, а качественная оценка, то есть эксперту предлагается оценить не отдельный фактор, а соотнести его воздействие с воздействием других производственных факторов.

После проведения опроса экспертов их оценки были обобщены, определена согласованность их мнений. Применен метод ранговой корреляции. Полученные результаты используются при разработке мероприятий по предупреждению производственного травматизма и улучшению условий труда с целью снижения уровня профессиональной заболеваемости.

Результаты. Экспертам было предложено оценить степень воздействия 14 производственных факторов на работников путевого комплекса. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Распределение производственных факторов, воздействующих на монтеров пути, по степени значимости

№	Производственный фактор	Сумма рангов
1	Опасность от подвижного состава и других транспортных средств	39,5
2	Недостаточность или отсутствие естественного освещения	54,0
3	Повышенный уровень шума	74,0
4	Повышенная запыленность	94,5
5	Повышенный уровень вибрации	94,5
6	Неудобное оборудование и недостаточная автоматизация рабочего места	105,0
7	Использование небезопасных машин и механизмов	107,7
8	Несоответствие спецодежды, спецобуви и СИЗ особенностям выполняемой работы	108,5
9	Недостаточная освещенность рабочего места	112,0
10	Повышенная или пониженная температура воздуха	117,0
11	Радиация	154,0
12	Ядовитые пары, агрессивные, химические вещества, моющие и чистящие средства	160,0
13	Несовершенные, неудобные в работе, плохо установленные средства отображения информации	171,5
14	Работа на высоте	183,0

Для определения согласованности мнений экспертов были рассчитаны отклонение суммы рангов каждого фактора от средней суммы рангов d и коэффициент конкордации W .

Для определения согласования мнений экспертов рассчитывается отклонение суммы рангов каждого фактора от средней суммы рангов:

$$d = \sum d_i^2 = \sum \left(\sum R_{ij} - \frac{m(n+1)}{2} \right)^2 = 23429 \quad (1)$$

где R_{ji} – ранг, присвоенный i -му фактору j -ым экспертом;

m – число экспертов;

n – число факторов.

Далее рассчитываем коэффициент конкордации (согласованности):

$$W = \frac{12d}{m^2(n^3-n)} = 0,51 \quad (2)$$

Полученное после обработки результатов опроса экспертов значение коэффициента конкордации W , равное 0,51, означает среднюю степень согласованности мнений экспертов, однако данные исследования могут быть использованы при разработке рекомендаций и мероприятий по повышению безопасности и оздоровлению условий труда монтеров пути.

Обсуждение. Анализ результатов опроса, несмотря на среднюю степень согласованности

мнений экспертов, показывает безусловное признание работу в зоне движения подвижного состава и другого транспорта наибольшей опасностью. Таким образом, можно сделать вывод, что разработка средств оповещения о приближении поезда, способов ограждения места работы, исследование возможностей определения местоположения работающего персонала на железнодорожных путях, являются актуальными и перспективными с точки зрения потенциального влияния их результатов на снижение производственного травматизма.

Следует отметить, что опасность работы в зоне движения осознаётся работниками путевого хозяйства, поскольку оценивается достаточно высоко, однако расследование происшествий, связанных с наездом подвижного состава на работающих на путях в большом количестве случаев выявляют те или иные нарушения инструкций и правил проведения работ на железнодорожных путях.

Так, 26 октября 2023 г. на Южно-Уральской железной дороге в результате наезда грузового поезда во время работы на железнодорожных путях были смертельно травмированы два монтера пути.

4 декабря 2023 г. на станции Бекасово при очистке стрелочных переводов от льда и снега в темное время суток был в результате наезда порожней плат-

формы, находившейся в составе отцепы при распуске вагонов был травмирован монтер пути. Стаж работы пострадавшего более 19 лет.

12 декабря 2023 г. на перегоне Байкальск - Выдрино смертельно травмирован монтер пути, назначенный руководителем работ для выполнения обязанностей сигналиста. Находясь на железнодорожных путях, пострадавший не реагировал на сигналы, подаваемые приближающимся поездом. Несмотря на применение экстренного торможения, наезд предотвратить не удалось. Стаж работы пострадавшего на железнодорожном транспорте и по профессии более 15 лет [20].

Безусловно, будут проверены все обстоятельства, послужившие причиной несчастных случаев, однако, эти и подобные происшествия с опытными обученными работниками, прошедшими все предусмотренные инструктажи и медосмотры, свидетельствуют о необходимости поиска таких решений и проведении таких мероприятий по повышению безопасности труда, которые могли бы качественно изменить ситуацию. Развитие культуры безопасности может привести к положительным изменениям при неформальном подходе.

Неблагоприятными производственными факторами, занимающими второе и третье места, по мнению экспертов, являются недостаточное естественное освещение (то есть, работа в темное время суток) и повышенный уровень шума. Учитывая географическое положение, можно отметить, что недостаток естественного освещения характерен для работ на открытом воздухе в течение значительной части года на большом протяжении железных дорог. Наряду с повышенной утомляемостью работа при недостаточном освещении может привести к потере внимания и бдительности, что может послужить одной из причин несчастного случая. Возможно, одним из путей решения этой проблемы может быть пересмотр норм выработки в темное время суток с целью предотвращения необходимости работать с той же производительностью, как при естественном дневном освещении.

Повышенный уровень шума является особенностью многих работ в путевом комплексе, поскольку они могут выполняться без прекращения движения по соседним путям. Кроме того, применяемый при путевых работах инструмент является источником шума [21]. Повышенный уровень шума может быть не только причиной развития профессионального заболевания, но и послужить косвенной причиной несчастного случая, поскольку повышает уровень стресса, утомления, которые сопровождаются снижением концентрации, внимания.

Выводы. Результаты, полученные в процессе изучения воздействия на монтеров пути производственных факторов, подтверждают необходимость системного подхода к повышению безопасности труда, который лежит в основе культуры безопасности. Каждый из производственных фак-

торов непосредственно оказывает влияние на работника, но кроме того, может стать причиной увеличения тяжести последствий воздействия других производственных факторов. Это обстоятельство может служить одним из объяснений средней степени согласованности мнений экспертов, поскольку сложно выделить влияние каждого из одновременно действующих факторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Российский статистический ежегодник. 2023: Стат.сб./ Росстат. – Р76 М., 2023 – 701 с.
2. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 30.01.2024) https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LA (дата обращения 31.01.2024г.).
3. URL: <https://showdata.gks.ru/finder/reports/> (дата обращения 31.01.2024г.).
4. URL: https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Frosstat.gov.ru%2Fstorage%2Fmedia-bank%2FPr_travm.xlsx&wdOrigin=BROWSELINK (дата обращения 31.01.2024г.).
5. URL: <https://gudok.ru/content/infrastructure/1628580/?ysclid> (дата обращения 31.01.2024г.).
6. Распоряжение ОАО «РЖД» от 09.03.2023 N 515/р «Об утверждении СТО РЖД 15.001-2023 «Система управления охраной труда в ОАО «РЖД». Общие положения» URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc (дата обращения 31.01.2024г.).
7. Об утверждении положения о культуре безопасности в холдинге «РЖД»: распоряжение ОАО «РЖД» от 1.06.2020 № 1181/р URL: <https://aksioma.szd.online/docs/polozenie> (дата обращения 31.01.2024г.).
8. Маркелова С. В. Культура безопасности на производстве // 2022. №48 (93). URL: <https://scilead.ru/article/3315-kultura-bezopasnosti-na-proizvodstve> (дата обращения 31.01.2024г.).
9. Романов, И.О. Перспективы развития культуры безопасности в холдинге «Российские железные дороги» / И.О. Романов, Е.А. Рябчиков // Вестник института тяги и подвижного состава. – 2021. – № 17. – С. 40-41. – EDN CL-DGAV.
10. Асламова В.С. Анализ культуры безопасности ОАО «Российские железные дороги» / В.С. Асламова, И.А. Умудова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 2(78). С. 166–175. DOI 10.26731/1813-9108.2023.2(78).166-175.
11. Шадыев, Р.Р. Статистическая оценка вероятности воздействия факторов производственной среды / Р.Р. Шадыев, А.М. Королева // Гигиена, окружающая среда и риски здоровью в современных условиях: Материалы XIII Всероссийской научно-практической интернет-конференции молодых ученых и специалистов Роспотребнадзора с международным участием, Саратов, 26–27 апреля 2023 года. – Саратов: Общество с ограниченной ответственностью «Амирит», 2023. – С. 311-314. – EDN TWXZYX.
12. Федеральный закон от 10.01.2003 N 17-ФЗ (ред. от 13.06.2023) «О железнодорожном транспорте в Российской Федерации» URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_40443/ (дата обращения 31.01.2024г.).
13. Struchalin, V.G. Simulation of the Dangerous Events Occurrence in Technological Processes in Railway Transport / V.G. Struchalin, E.Y. Narusova // Proceedings of the 2021 IEEE International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies", T and QM and IS 2021, Yaroslavl, 06–10 сентября 2021 года. – Yaroslavl, 2021. – P. 127-130. – DOI 10.1109/ITQMIS53292.2021.9642781. – EDN GWEDGZ.
14. Стручалин, В.Г. Моделирование формирования экспертных требований к средствам оповещения для обеспечения безопасности работ на железнодорожных путях / В.Г. Стручалин, Е.Ю. Нарусова, В.Ю. Навцена // Качество. Инновации. Образование. – 2021. – № 2(172). – С. 48-55. – DOI 10.31145/1999-513x-2021-2-48-55. – EDN CELLWX.
15. Нотченко, Е.Е. Анализ производственного травматизма работников путевого комплекса / Е.Е. Нотченко, А.М. Завьялов // Проблемы безопасности российского общества. –

2020. – № 1(29). – С. 40-45. – EDN NPFVGJ.

16. Завьялов, А.М. Исследование причин несчастных случаев в хозяйстве пути на основе методов регрессионного анализа / А.М. Завьялов, Ю.В. Дементьева, Д.Л. Раенок // Проблемы безопасности российского общества. – 2017. – № 2. – С. 77-85. – EDN OSXDWT.

17. Фомина, Н.Б. Пути снижения производственного травматизма у работников путевого хозяйства / Н.Б. Фомина, Н.С. Тютюрев // Современные тенденции развития науки и мирового сообщества в эпоху цифровизации: Сборник материалов XI Международной научно-практической конференции, Москва, 20 января 2023 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью «Издательство АЛЕФ», 2023. – С. 402-405. – EDN QBMNHJ.

18. Малиевский, К.К. Роль системы информации «Человек на пути» в обеспечении безопасности при проведении путевых работ / К.К. Малиевский, Н.Б. Фомина // Формирование профессиональной направленности личности специалистов - путь к инновационному развитию России: Сборник статей IV Всероссийской научно-практической конференции, Пенза, 21 декабря 2022 года / Под редакцией А.В. Киевского. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2022. – С. 121-126. – EDN MIUVNM.

19. Раенок, Д.Л. Роль системы информации «человек на пути» в профилактике наездов подвижного состава / Д.Л. Раенок, Е.А. Муштонина, Г.В. Голышева // Наука и техника транспорта. – 2017. – № 4. – С. 91-94. – EDN YLFNBO.

20. URL: <https://clubzd.ru/index.php/topic,5.0.html> (дата обращения 31.01.2024г.).

21. Снижение вредного воздействия факторов трудового процесса на здоровье работников путевого комплекса железных дорог / Е.Ю. Нарусова, В.Г. Стручалин, А.Н. Степанов [и др.] // Вестник НЦБЖД. – 2022. – № 1(51). – С. 171-177. – EDN VSOJVF.

Статья поступила в редакцию 05.02.2024

Статья принята к публикации 15.03.2024

УДК 629.12.002

EDN: PKTMMF

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА СУДНА

© Автор(ы) 2024

SPIN: 8233-4649

AuthorID: 393288

ORCID: 0000-0002-0155-7324

НАУМОВ Виктор Степанович, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Охрана окружающей среды и производственная безопасность»

Волжский государственный университет водного транспорта
(603950, Россия, город Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: kaf_oospb@vsuwt.ru)

SPIN: 7010-5471

AuthorID: 765920

ORCID: 0000-0002-5612-3742

КОЧНЕВА Ирина Борисовна, кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Охрана окружающей среды и производственная безопасность»
Волжский государственный университет водного транспорта
(603950, Россия, город Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: iringre@mail.ru)

Аннотация. В обзоре рассмотрены подходы для оценки экологической безопасности. Проанализированы практики применения подходов к оценке экологической безопасности судостроительных предприятий, эксплуатационного периода судна, утилизации судна на предприятиях, аварийных ситуаций в процессе эксплуатации, связанных с попаданием груза в воду и на прибрежную полосу. Рассмотрен активно развивающийся метод оценки жизненного цикла продукции, имеющий собственную структуру и процедуру, с целью использования его для оценки воздействия судна на окружающую среду на протяжении жизненного цикла от проектирования до утилизации. Существующие достоинства и недостатки методов оценки экологической безопасности позволили прийти к выводу, что для объективной и достаточно быстрой оценки степени экологической опасности судна, того или иного этапа его жизненного цикла, необходимо разработать новый подход, учитывающий недостатки существующих. Разработка такого подхода является насущной необходимостью, а его внедрение должно позволить выбрать наиболее эффективные мероприятия для решения приоритетных экологических задач на основе оценки экологической безопасности судна, как продукта судостроительной отрасли, отражающий весь его жизненный цикл.

Ключевые слова: судно, судостроительная отрасль, утилизация судна, эксплуатация судна, оценка жизненного цикла, негативное воздействие на окружающую среду, оценка экологической опасности, оценка воздействия, экологический аспект, экологические показатели.

ANALYSIS OF THE THEORY AND PRACTICE OF ENVIRONMENTAL SAFETY ASSESSMENT AT THE STAGES OF THE SHIP'S LIFE CYCLE

© The Author(s) 2024

NAUMOV Victor Stepanovich, doctor of technical sciences, professor,
head of the Department of the Environmental Protection and Industrial Safety
Volga State University of Water Transport
(603951, Russia, Nizhny Novgorod, Nesterova street, 5, e-mail: kaf_oospb@vsuwt.ru)

KOCHNEVA Irina Borisovna, ph.d. in engineering science, associate professor,
associate professor of the Environmental Protection and Industrial Safety
Volga State University of Water Transport
(603951, Russia, Nizhny Novgorod, Nesterova street, 5, e-mail: iringre@mail.ru)

Abstract. The review considers approaches for assessing environmental safety. The practice of applying approaches to assessing the environmental safety of shipbuilding enterprises, the operational period of the ship, the disposal of the ship at enterprises, emergency situations during operation associated with the ingress of cargo into the water and on the coastal strip is analyzed. An actively developing life cycle assessment method is considered, which is used to assess the environmental impact of products, having its own structure and procedure, in order to use it to evaluate a ship as a product throughout its life cycle from design to disposal. The existing advantages and disadvantages of environmental safety assessment methods led to the conclusion that for an objective and sufficiently rapid assessment of the degree of environmental hazard of a ship, one or another stage of its life cycle, it is necessary to develop a new approach that takes into account the shortcomings of existing ones. The development of such an approach is an urgent need. And the implementation should make it possible to choose the most effective measures to solve priority environmental problems based on an assessment of the environmental safety of the ship as a product of the shipbuilding industry, reflecting its entire life cycle.

Keywords: ship, shipbuilding industry, ship recycling, operation of the ship, life cycle assessment, negative environmental impact, environmental hazard assessment, impact assessment, environmental aspect, environmental indicators.

Для цитирования: Наумов В.С. Анализ состояния теории и практики оценки экологической безопасности на этапах жизненного цикла судна / В.С. Наумов, И.Б. Кочнева // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 1(65). – С. 140-144. – EDN: PKTMMF.

Введение. Целью государственной программы РФ «Охрана окружающей среды» является повышение уровня экологической безопасности, а одной из задач – снижение негативного воздействия на окружающую среду [1]. В связи с чем, сведение к минимуму воздействий на окружающую среду любых видов продукции на всех этапах ее жизненного цикла является актуальной задачей, решение которой повышает экологическую эффективность хозяйственной деятельности.

Жизненный цикл судна реализуют судостроительные, судоремонтные предприятия, транспортные компании, предприятия машиностроения, которые выполняют научно-исследовательские, проектно-конструкторские работы, постройку, эксплуатацию, ремонт и утилизацию судов [2, 3].

Поскольку негативное воздействие на окружающую среду на предприятиях возникает при производстве, эксплуатации, ремонте, утилизации продукции, то технологические процессы, используемые на предприятиях, и сама продукция принимаются за источники воздействия на окружающую среду.

Поэтому актуальны работы, направленные на разработку эффективных методик определения экологических показателей продукции на всех этапах ее жизненного цикла.

Целью работы является анализ состояния вопросов оценки воздействия судна на окружающую среду и обоснования необходимости разработки интегрального показателя экологической безопасности судна, комплексно оценивающий его воздействие на всех этапах жизненного цикла.

Методология. Методы анализа нормативных документов и литературных источников использованы в работе с целью актуализации вопросов оценки экологической опасности на этапах жизненного цикла судна.

При анализе нормативных документов и литературных источников были рассмотрены методы оценки рисков, ущерба, жизненного цикла продукции, нормирования показателей.

Результаты. Жизненный цикл судна, как продукта, можно представить последовательностью следующих этапов (рис. 1).

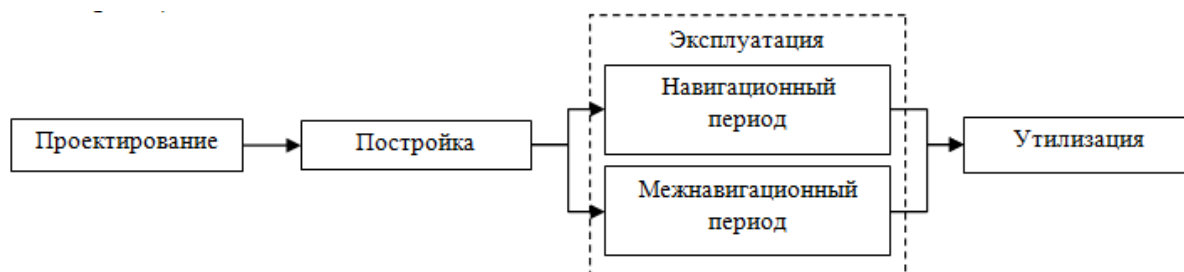


Рисунок 1 – Этапы жизненного цикла судна

На стадии проектирования формируются все решения по судну: архитектура, конструкция, расположение помещений, судовые системы, узлы и агрегаты, тип материалов, соответствующие требованиям заказчика, классификационных обществ, контрольных органов.

Производственный процесс постройки судна, осуществляется на судостроительных предприятиях и включает изготовление и монтаж корпуса и надстройки, судовых устройств, дельных вещей, судовых систем, судовых энергетических установок, электрооборудования, изоляции, зашивки, отделки судовых помещений, навигационного оборудования, энергетических установок [4].

На этапе эксплуатации судно выполняет свою хозяйственную задачу по перевозке грузов, пассажиров, служебно-вспомогательные функции по обслуживанию флота и портового хозяйства. При этом элементы корпуса судна изнашиваются, повреж-

даются и теряют свои прочностные характеристики. Ремонт повреждений и износов осуществляют на судостроительных и судоремонтных предприятиях с применением механической и тепловой резки, разделки кромок, сварки, очистки сварных швов от шлака и брызг металла, окраски.

По завершении эксплуатационного периода судно переходит на стадию утилизации. Утилизацию судна выполняют путем разделки корпуса и надстройки судна на лом, предварительно осуществив демонтаж механизмов, устройств, систем, обстройки. В зависимости от конкретного судна утилизацию проводят на судостроительных, судоремонтных предприятиях, либо на подготовленных площадках.

Таким образом, на этапе постройки судна, ремонтных, модернизационных, сервисных работах эксплуатационного периода и утилизации судна, экологические аспекты связаны с предприятиями судостроения и судоремонта.

Для установления экологических воздействий предприятия в Российской Федерации действует экологическая экспертиза и оценка воздействия на окружающую среду [5].

Подходы к обеспечению экологической безопасности, оценке уровней экологической безопасности основных видов судостроительного, судоремонтного производств, проблемы экологизации производства рассматривались в трудах отечественных ученых.

В ряде работ основное внимание уделялось совершенствованию технологических процессов и производственного оборудования судостроительных, судоремонтных предприятий, направленное на уменьшение выбросов вредных веществ в местах их образования [6, 7].

Задача обеспечения экологической безопасности при утилизации судов на судовой поверхности решалась путем выбора технологии разделки судов с учетом экономических критериев и существующих экологических ограничений [8]. Использована оценка экологического риска, как одного из методов оценки опасности, связанного с негативным воздействием на окружающую среду при нормальном функционировании предприятия по утилизации судов, а также при аварийных ситуациях, и определен общий объем загрязнений от разделки судов за определенный период времени [9].

Проведена оценка экологической опасности утилизации судов на основе анализа риска причинения ущерба окружающей среде. При этом оценено воздействие на начальном этапе утилизации – хранении судна и его транспортировке в центр по утилизации [10].

Решением вопросов утилизации судов, постоянно занимается Международная морская организация, уделяя при этом значительное внимание вопросам охраны окружающей среды и ресурсосбережения. Под эгидой данной организации разработан ряд руководств и Гонконгская международная конвенция о безопасной и экологически рациональной утилизации, в которых разработаны мероприятия по подготовке судов к разделке и сведения к минимуму использования потенциально вредных материалов на судне [11-16].

В период эксплуатации воздействие судна на окружающую среду связано с образованием сухого бытового мусора, твердых пищевых отходов, отходов технической эксплуатации судна, сточных вод – хозяйственно-бытовых, хозяйственно-фекальных, нефтесодержащих, промывных, балластных, выбросы энергетических установок.

Для обеспечения экологичности судов Правилами классификационных обществ введены требования к конструктивной, технологической, активной инженерной защите окружающей среды. Реализация перечисленных способов инженерной защиты окружающей среды связана с оборудованием судов емкостями для сбора сточных, балластных, промывных вод, твердых отходов (сухого бытового мусора,

твердых пищевых отходов, отходов от технического обслуживания судна), станциями очистки сточных вод, устройствами для обработки мусора, системами автоматического замера, регистрации и управления сбросом, двойными бортами и дном [17-20]. Данные требования, как минимально необходимые, для обеспечения экологической безопасности закладываются в проект судна на начальной стадии жизненного цикла – проектирования, реализуя нормирование воздействия на окружающую среду.

На этапе эксплуатации решались вопросы оценки экологических рисков, воздействия на окружающую среду при разливах нефти и нефтепродуктов, сухих грузов, пожаров разлива нефтепродуктов на водных объектах [21, 22].

Для оценки экологической безопасности судна в навигационный период на этапе эксплуатации предложен показатель «экологическая эффективность», представляемый как вероятности предотвращения вредного воздействия на окружающую среду нефтесодержащих, хозяйственно-бытовых сточных вод, мусора, отработанных газов от работы судовой энергетической установки [23].

Но необходимо учитывать, что судно, как продукт, проходит последовательно этапы жизненного цикла и на каждом этапе происходит негативное воздействие на окружающую среду. В настоящий момент разработан ряд методов, используемых для выявления, учета и численной оценки экологических аспектов [24].

Активно развивается и используется для научных исследований и практической деятельности, методика оценки жизненного цикла. Введена в действие серия стандартов ГОСТ Р ИСО 14040 – 14046, определяющая принципы, требования и структуру, а также процедуру оценки жизненного цикла, которая состоит из следующих этапов: определение цели и области исследования, инвентаризационный анализ жизненного цикла, оценка воздействия жизненного цикла на окружающую среду, интерпретация результатов исследования.

Оценка жизненного цикла отличается от многих других методов (например, оценок риска, экологической эффективности), так как применяет относительный подход, использующий функциональную единицу, которая количественно характеризует функционирование продукта. А также является инструментом комплексной оценки воздействия видов деятельности на окружающую среду, охватывая приобретение сырья, производство, использование, переработку, утилизацию.

Данный метод активно применяется в России и за рубежом в системах управления твердыми коммунальными отходами, что иллюстрируется наличием большого количества программных продуктов: *SimaPro*, *CML*, *GaBi*, *EASEWASTE*, *IWM LCA* [25-27]. Также метод используется в оценке экологической безопасности объектов строительства, оборудования, технологий, производственных

объектов [28].

Обсуждение. На настоящий момент необходимость оценки экологической безопасности продукции для рациональной охраны окружающей среды не вызывает сомнений. В связи с чем, активно развивается такой метод как оценка жизненного цикла продукции.

Такой инструмент рассматривает весь жизненный цикл продукции и поэтому объективно может быть представлено воздействие продукции на окружающую среду. Такой подход к экологической оценке продукции дает возможность оптимизации хозяйственной деятельности, так как есть возможность оценить экологические аспекты продукции, связанные с этапами ее жизненного цикла. Иными словами проследить цепочку негативного воздействия на окружающую среду от используемых материалов до утилизации продукции, что другие подходы не дают возможности оценить.

Таким образом, использование методики, ориентированной на жизненный цикл, с ее широкими возможностями практического применения, для экологической оценки судна, как продукта судостроительной отрасли, представляет своевременную актуальную задачу.

Неблагоприятное воздействие судостроительной отрасли на окружающую среду в значительной степени обусловлено используемыми технологиями на судостроительных, судоремонтных предприятиях, т.е. общим количеством отходов производственных процессов, энерго- и материалоемкостью средств технологического оснащения, использованием малоотходных технологий. Также существенную роль играет выполнение природоохранных требований и мероприятий на предприятиях при постройке, ремонте, модернизации, утилизации судна, а в процессе эксплуатации – собственником и командой судна (например, выполнение установленных технических требований, экологических норм, стандартов, природоохранных мероприятий, требований по организации производственного экологического контроля, наличие несанкционированных выбросов и сбросов в окружающую среду).

Таким образом, оценку экологической опасности судна предлагается производить по факторам, характеризующим воздействие на компоненты окружающей среды – это выброс, сброс, отходы, нарушенные земли. При этом считаем, что необходимо учитывать возможный вероятный характер негативного воздействия объектов судостроительной отрасли на окружающую среду (например, при авариях, неправомерных выбросах и др.).

Исходя из этого, предлагаем для оценки экологической безопасности судна разработать интегральный показатель экологической безопасности судна, отражающий уровень его экологической опасности. Для этого необходимо исследовать эмиссии в различные компоненты природной среды, факторы воздействия на окружающую среду и уста-

новить уровни их воздействия и весомости факторов для элементов биосферы на всех этапах жизненного цикла судна.

Выводы. Судостроительная отрасль сегодня является одной из динамично развивающихся отраслей промышленности. Качественный состав образующихся загрязняющих веществ чрезвычайно разнообразен. А технологическое перевооружение отрасли потребует интенсификации производственных процессов, внедрение новых технологий и материалов, что приведет к увеличению объемов эмиссий в окружающую среду и расширению их номенклатурного ряда. В связи с этим обеспечение экологической безопасности судостроительной отрасли в настоящее время является актуальной задачей.

Анализ нормативных документов, подходов, методик оценки экологической безопасности показал, что они имеют ряд недостатков. А именно, сложности в решении вопросов сокращения издержек за счет рационального использования сырья, материалов, энергии, ранжировании продукции с позиций их экологической безопасности, разработке и производстве более экологичных продуктов, невозможности учета степени влияния экологических аспектов на окружающую среду. А так же можно сказать об отсутствии критериев для комплексной оценки уровня экологической безопасности судна, как продукта судостроительной отрасли.

Таким образом, предлагаем разработать метод комплексной оценки экологической безопасности судна, как продукта судостроительной отрасли, внедрение которого должно позволить оптимизировать негативное воздействие судна на этапах его жизненного цикла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Государственная программа Российской Федерации «Охрана окружающей среды» (с изменениями, утвержденными постановлением Правительства РФ от 24.06.2022 № 1132).
2. Распоряжение Правительства РФ от 28.10.2019 N 2553-р «Об утверждении Стратегии развития судостроительной промышленности на период до 2035 года».
3. Наумов, В.С., & Кочнева, И.Б. (2022). Совершенствование экологической маркировки судов. Научные проблемы водного транспорта, (71), 268-276. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi71.269>
4. Наумов, В.С. Анализ экологических аспектов жизненного цикла судна / В.С. Наумов, И.Б. Кочнева // Речной транспорт (XXI век). – 2023. – № 2(106). – С. 48-50.
5. Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» // Собрание законодательства РФ. – 14.01.2002. – № 2. – ст. 133.
6. Бурмистров, Е.Г. Оптимизация параметров технологических процессов как условие повышения экологической безопасности производства [Текст] / Е.Г. Бурмистров // Транспорт XXI век: материалы науч.-метод. конф. проф.-преп. состава, аспирантов и специалистов. Ч.3/ ВГАВТ. – Н.Новгород, 2003. – С. 103-107.
7. Михеева, Т.А. Совершенствование экологической безопасности процесса механизированной тепловой резки в судостроении [Текст] / Т.А. Михеева, Е.Г. Бурмистров // Междунар. науч.-пром. форум "Великие реки 2006". – Н. Новгород, 2006. – С. 236-238.
8. Студнев, С.В. Обоснование выбора технологии разделки судов на лом с учетом экономических критериев и существующих экологических ограничений [Текст] / С.В.

Студнев, Е.Г. Бурмистров, Т.А. Михеева // Вестник / ВГАВТ. – Н.Новгород, 2015. – Вып. 44. – С. 192-199.

9. Студнев, С.В. Экологические риски при разделке судов на лом / С.В. Студнев, Е.Г. Бурмистров // Экология и промышленность России. – 2015. – Т. 19, № 6. – С. 50-54.

10. Кочнева, И.Б. Управление экологическими рисками на этапах жизненного цикла судна / И.Б. Кочнева // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. – 2015. – № 44. – С. 175-178. – EDN VJQSHN.

11. Regulation (EU) No 1257/2013 of the European Parliament and of the Council of 20 November 2013 on ship recycling and amending Regulation (EC) No 1013/2006 and Directive 2009/16/EC. – Режим доступа: http://www.safety4sea.com/images/media/pdf/EU_Ship-Recycling-Regulation.pdf.

12. Resolution MEPC.196(62)-2011. Guidelines for the Development of the Ship Recycling Plan. – Режим доступа: [http://www.imo.org/OurWork/Environment/ShipRecycling/Documents/RESOLUTION_MEPC.196\(62\).pdf](http://www.imo.org/OurWork/Environment/ShipRecycling/Documents/RESOLUTION_MEPC.196(62).pdf).

13. Resolution MEPC.210(63)-2012. Guidelines for Safe and Environmentally Sound Ship Recycling. – Режим доступа: [http://www.imo.org/OurWork/Environment/ShipRecycling/Documents/210\(63\).pdf](http://www.imo.org/OurWork/Environment/ShipRecycling/Documents/210(63).pdf).

14. Resolution MEPC.211(63)-2012. Guidelines for the Authorization of Ship Recycling Facilities. – Режим доступа: [http://www.imo.org/OurWork/Environment/ShipRecycling/Documents/211\(63\).pdf](http://www.imo.org/OurWork/Environment/ShipRecycling/Documents/211(63).pdf).

15. Resolution MEPC.197(62)-2011. Guidelines for the Development of the Inventory of Hazardous Materials. – Режим доступа: [http://www.imo.org/OurWork/Environment/ShipRecycling/Documents/Resolution_MEPC.197\(62\).pdf](http://www.imo.org/OurWork/Environment/ShipRecycling/Documents/Resolution_MEPC.197(62).pdf).

16. Руководство ИМО по разделке судов; резолюция А.962(23) ИМО. – СПб.: ЗАО ЦНИИМФ, 2004. – 136 с.

17. ФАУ «Российское Классификационное Общество». Правила классификации и постройки судов. URL: <https://rfclass.ru/assets/Uploads/PKPS-RKO.pdf?t=1703756036> (дата обращения 28.12.2023).

18. ФАУ «Российский морской регистр судоходства». Правила классификации и постройки морских судов. URL: <https://lk.rs-class.org/regbook/rules>. (дата обращения 28.12.2023).

19. DNV GL. Rules for classification: General. URL: <https://rules.dnv.com/docs/pdf/DNV/RU-SHIP/2021-07/DNV-RU-SHIP-Pt1Ch2.pdf> (дата обращения 28.12.2023).

20. Bureau Veritas. Rules for the classification of steel ships. URL: <https://marine-offshore.bureauveritas.com/nr467-rules-classification-steel-ships> (дата обращения 28.12.2023).

21. Пластинин, А.Е. Оценка ожидаемого ущерба водным объектам при разливах нефти / А.Е. Пластинин // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2013. – № 1(20). – С. 97-104. – EDN RGPDX.

22. Оценка опасности и локализация пожаров разлива нефтепродуктов на водных объектах / В.С. Наумов, А.Е. Пластинин, Н.И. Волкова, А.Д. Шапошников // Морские интеллектуальные технологии. – 2022. – № 2-1(56). – С. 269-278. – DOI 10.37220/МИТ.2022.562.035. – EDN OZPHF.

23. Соловьев А.В. Методика оценки экологической эффективности судов внутреннего плавания / А.В. Соловьев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. – 2017. – Т. 9. – № 2. – С. 306-322. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-306-322.

24. Омельченко И.Н. Современные подходы к оценке жизненного цикла продукции / И.Н. Омельченко, А.Е. Бром // Вестник Волжского университета им. В.Н. Татищева. – 2013. – № 2(21). – С. 29-34. – EDN ROMOYD.

25. Introduction to LCA with SimaPro / PRe; M. Goedkoop, M. Oele, J. Leijting, T. Ponsioen, E. Meijer. 2016, 80 p. Available at: URL: <https://www.pre-sustainability.com/download/Sima-Pro8IntroductionToLCA.pdf> (дата обращения 17.01.2024).

26. GaBi Database & Modelling Principles, 2017, 194 p. Available at: URL: https://www.gabi-software.com/fileadmin/GaBi_Databases/GaBi_Modelling_Principles_2017.pdf (дата обращения 17.01.2024).

27. Bhandar G.S., Christensen T.H., Hauschild M.Z. EASEWASTE – life cycle modeling capabilities for waste management technologies. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2010, vol. 15, no. 4, pp. 403-416.

28. Суздалева А.Л. Методика системной оценки

экологической безопасности оборудования, технологий, производственных объектов // Экология производства. – 2015. №11. – С.78-85.

Статья поступила в редакцию 31.01.2024

Статья принята к публикации 15.03.2024

УДК 378.14

EDN: PKBBQI

**ПОВЫШЕНИЕ МЕР БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ РАБОТ НА НЕУСТОЙЧИВЫХ
ДЕРЕВЯННЫХ ОПОРАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИСТАВНЫХ ЛЕСТНИЦ**

©Автор(ы) 2024

SPIN: 9801-3490

AuthorID: 704170

ORCID: 0000-0002-7423-4892

ResearcherID: P-5020-2015

ScopusID: 6507592108

СЕНЧЕНКО Владимир Александрович, магистрант
по направлению подготовки «Техносферная безопасность»*Российский государственный социальный университет**(129226, Россия, г. Москва, ул. Вильгельма Пика д. 4 стр. 1, e-mail: Vladimir.senchenko1973@gmail.com)*

SPIN: 1353-8309

AuthorID: 970943

ORCID: 0000-0001-6319-5413

ScopusID: 57210910552

КАВЕРЗНЕВА Татьяна Тимофеевна, кандидат технических наук, доцент,
доцент Высшей школы техносферной безопасности*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,**(Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; e-mail: kaverztt@mail.ru)*

SPIN: 4539-4290

AuthorID: 461109

ScopusID: 57203929295

ФЕТИСОВ Александр Георгиевич, кандидат технических наук, доцент,
исполняющий обязанности заведующего кафедрой, доцент кафедры 1104*Московский авиационный институт**(Россия, г. Москва, 125993, Волоколамское шоссе, д. 4, e-mail: ptbur@mai.ru)*

SPIN: 4988-3571

AuthorID: 70028

ORCID: 0000-0003-2106-9122

ScopusID: 15064379200

МЕССИНЕВА Екатерина Михайловна, кандидат биологических наук, доцент,
доцент кафедры 1104*Московский авиационный институт**(Россия, г. Москва, 125993, Волоколамское шоссе, д. 4, e-mail: messinevaem@mai.ru, musculus@mail.ru)*

Аннотация. Статья посвящена проблемам обеспечения безопасности работников при использовании приставных лестниц для подъема на деревянные опоры воздушных линий связи и линий электропередач. В ней рассматриваются методы контроля состояния таких опор, а также представлено инженерное решение, целью которых является предотвращение возникновения производственных травм при выполнении работ на высоте при работе с приставными лестницами. В работе приводится схема установки лестницы к деревянной опоре, а также рассмотрены силы, действующие в момент подъема работника, которые могут вызвать падение опоры и подробно рассмотрено инженерное решение, позволяющее предотвратить производственный травматизм, связанный с падением работника вместе с опорой. Авторы предлагают новый способ крепления верхней части лестницы, который заключается в использовании универсальной насадки с опорными штангами, обеспечивающими устойчивость всей конструкции. В процессе работы показано, что универсального эффективного технического решения для обеспечения полной безопасности работ на деревянных опорах с использованием приставных лестниц не существует. Тем не менее набор различных технических решений, включающий рассмотренные и предложенные в работе, позволяет снизить уровень травматизма и повысить уровень безопасности труда.

Ключевые слова: работы на высоте, приставные лестницы, воздушные линии связи, деревянные опоры, неустойчивые опоры, падение деревянных опор, загнивание деревянных опор, насадка на лестницу, обеспечение безопасности, производственный травматизм

**SAFETY MEASURES IMPROVING DURING WORKING ON UNSTABLE WOODEN SUPPORTS USING
ATTACHED LADDERS**

©The Author(s) 2024

SENCHENKO Vladimir Alexandrovich, master's student of "Technosphere Safety" training direction

Russian State Social University

(Russia, 129226, Moscow, Wilhelma Pika str. 4 p. 1, e-mail: Vladimir.senchenko1973@gmail.com)

KAVERZNEVA Tatiana Timofeevna, candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the
Higher School of Technosphere Safety

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

(Russia, 195251, St. Petersburg, 29, Polytechnicheskaya St.; e-mail: kaverztt@mail.ru)

FETISOV Alexander Georgievich, candidate of technical sciences, associate professor,
acting head of the Department, Associate Professor of the Department 1104

Moscow Aviation Institute

(Russia, 125993, Moscow, Volokolamskoe highway, 4, e-mail: ptbur@mai.ru)

MESSINEVA Ekaterina Mikhailovna, candidate of biological sciences, associate professor,
associate professor of the Department 1104

Moscow Aviation Institute

(Russia, 125993, Moscow, Volokolamskoe highway. 4, e-mail: messinevaem@mail.ru)

Abstract. The article is devoted to the problems of ensuring the safety of workers when using extension ladders to climb wooden supports of overhead communication and power transmission lines. It considers methods of controlling the condition of such supports, and also presents engineering solutions aimed at preventing occupational injuries during working at height with extension ladders. The paper presents a scheme of ladder installing on a wooden support, and also considers the forces acting at the moment of lifting the worker, which can lead to the fall of the support, and describes in detail an engineering solution to prevent occupational injuries associated with the worker's fall together with the support. The authors propose a new fixing method for the upper part of the ladder, which is the use of a universal fixing with support rods that provides stability to the entire structure. During the work it is shown that there is no universal effective technical solution providing full safety of working on wooden supports with the use of attached ladders. Nevertheless, the combination of various technical solutions, including considered and proposed in the work, allows to reduce the level of injuries and increase the level of labor safety.

Keywords: work at height, attached ladders, overhead lines, wooden supports, unstable supports, falling wooden supports, rotting wooden supports, ladder attachment, safety, occupational injuries

Для цитирования: Сенченко В.А. Повышение мер безопасности при выполнении работ на неустойчивых деревянных опорах с использованием приставных лестниц / В.А. Сенченко, Т.Т. Каверзнева, А.Г. Фетисов, Е.М. Мессинева // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 1(65). – С. 145-151. – EDN: PKBBQI.

Введение. Работы на высоте, как правило, производятся с помощью лестниц или специализированных подъемных устройств, надежность которых определяет уровень безопасности работ. Подъемы на небольшие высоты (до 5 метров), как правило, осуществляется с помощью приставных или переносных лестниц, которые обладают рядом преимуществ. Их легко и удобно использовать, они дешевы, обладают небольшим весом и, поэтому достаточно мобильны.

Во всем мире падение с высоты, в том числе с лестниц, является одной из основных причин травм с тяжелым или летальным исходом [1-4]. Например, в Чешской республике [5] летальные травмы в результате падения с высоты занимают второе место по частоте после травм, возникших в результате ДТП. Чаще всего подобные травмы случаются при строительных и ремонтных работах. В Китае в 2000-2020 годах падение с высоты стали причиной более половины смертельных несчастных случаев в строительстве и заняли третье место среди причин летального производственного травматизма в стране в целом [6.]. Похожие данные приводятся для Южной Кореи в работе [7], Индонезии [8] и Малайзии [9].

Статистические данные о производственном травматизме в Российской Федерации свидетельствуют о

том, что не менее 25 процентов от общего количества травм составляют травмы, возникшие при работе на высоте [10]. В работе [11] приводятся данные, согласно которым в 2018 году в России в результате падения с высоты произошел 31% несчастных случаев, 43% из которых имели тяжелые последствия.

В электроэнергетике работы на высоте широко используются при ремонтных работах на опорах воздушных линиях связи (ВЛС) и линиях электропередач (ВЛЭ). Существуют данные, что падение с высоты при выполнении опор ВЛЭ в процессе ремонтных работ, наряду с поражениями электрическим током и электрической дугой остается одной из основных причин производственного травматизма в энергетической отрасли [12].

На данный момент в Российской Федерации в эксплуатации находятся 4 основных типа опор ВЛС и ВЛЭ деревянные, железобетонные и композитные [13]. Все из них обладают определенными преимуществами и недостатками [13-18]. Деревянные опоры относительно дешевы как в изготовлении, так и в обслуживании, несмотря на относительно невысокий срок эксплуатации [15], связанный со слабой устойчивостью к гниению и возгоранию [13, 14]. Такие опоры могут быть относительно невысоки, в малонаселенной местности высота размещения

проводов может составлять от 3 до 6 метров, что облегчает их обслуживание в труднодоступных местах.

Согласно действующим нормативным документам лестницы, могут быть использованы для работы на высоте от 1,8 до 5 м, при большей высоте необходимо использовать канатное оборудование [19]. В связи с этим использование лестниц актуально как раз при ремонте оборудования, расположенного на низких деревянных опорах. На остальных типах опор при работе на высоте используют для подъема более сложное канатное оборудование с анкерными креплениями.

Существует несколько причин возникновения травм при использовании переносных или приставных лестниц при выполнении ремонтных работ на деревянных опорах ВЛЭ и ВЛС. Чаще всего к травме приводит обычное падение работника с лестницы. Кроме того, при работе на высоте с приставной или переносной лестницей возможны случаи падения работников с высоты, связанные с нарушением целостности опоры. Возможно также падение всей опоры (лестницы) вместе с работником. Причиной серьезной травмы может быть также скольжение лестницы, как по грунту, так и по поверхности опоры [20, 21], что делает необходимой разработку инженерных решений, направленных на надежную фиксацию лестницы на опоре. Таким образом, целью настоящего исследования является разработка подобного инженерного решения, необходимого для снижения уровня травматизма с летальным и тяжелым исходом при выполнении работ на высоте с использованием приставных лестниц для подъема и выполнения работ на неустойчивые невысокие деревянные опоры воздушных линий связи и линиях электропередач

Методология. В настоящее время, в эксплуатации, особенно в сельской местности, находится большое количество ВЛС и ВЛЭ с полностью деревянными опорами и опорами с деревянными приставками.

Как было показано выше, использование древесины в качестве основного материала для опор ВЛС и ВЛЭ имеет ряд преимуществ [14]. Прежде всего, они значительно дешевле железобетонных и других видов опор, при этом их запас прочности может быть не ниже, при условии правильной эксплуатации. Такая опора имеет относительно небольшой удельный вес, что существенно облегчает процесс ее монтажа и транспортировки в отдаленные районы. Древесина достаточно эластична, что позволяет ее широко применять в условиях повышенной ветровой нагрузки. Она устойчива к обледенению, поэтому ее можно относительно широко использовать деревянные опоры ВЛС и ВЛЭ в северных широтах и холодном климате. Для увеличения срока эксплуатации таких опор широко используются антисептические средства. Существенным преимуществом является то, что при падении деревянных опор не возникает эффект «домино», так как поврежденная опора за

счет невысокого удельного веса удерживается на проводах, не увлекая за собой соседние опоры, что может существенно облегчить ремонтные работы. Большое значение для электроэнергетики имеют их исключительные диэлектрические свойства.

Однако использование древесины в качестве материала для опор ВЛС и ВЛЭ имеет ряд недостатков, например, она подвержена гниению, приводящему к потере ее прочностных свойств. Чаще всего, деревянная опора гниет в сердцевине у поверхности, там, где она входит в землю, поскольку в этом месте чаще всего скапливается влага. Это место (3) указано на рисунке 1.

Следует отметить, что эта проблема характерна и для металлических опор. При установке в землю они ржавеют и портятся в месте соприкосновения с землей (рис. 1(3)) тоже за счет воздействия скапливающейся там влаги. Именно в этой точке при подъеме работника на опоры, начавшие разрушаться у основания, будет возникать существенная продольная нагрузки. В результате, в случае превышения прочности остальной части опоры, она может завалиться в противоположную сторону.

На рисунке 1 приведена простейшая схема установки лестницы к опоре ВЛС. Из него видно, что если непосредственно на опору (1), будет упираться верхняя часть лестницы (2) то при подъеме на нее в точке соприкосновения опоры с лестницей будет действовать продольная сила F . Эта сила будет действовать на рычаг, длина которого равно расстоянию H от точки соприкосновения лестницы с опорой до земли.

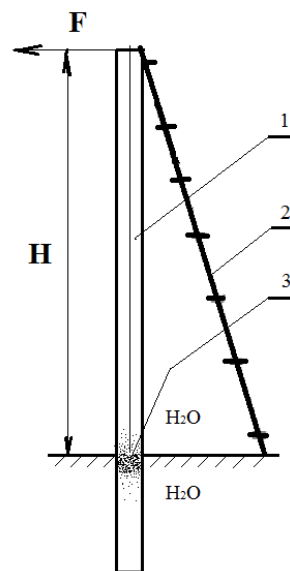


Рисунок 1 – Схема установки лестницы к опоре воздушной линии связи (объяснение в тексте)

При разработке технических решений необходимо учитывать это распределение сил при приложении лестницы к опоре. Кроме того, для повышения надежности линий и снижения затрат на эксплуатацию необходим тщательный надзор за состоянием опор и проведение профилактических мероприятий. В связи

с этим, важным этапом обеспечения безопасности работников при работе на лестницах на опорах ВЛС и ВЛЭ является контрольный осмотр опор.

Поскольку проблема своевременного обнаружения внутреннего загнивания деревянных опор чрезвычайно актуальна, готовое инженерное решение должно состоять из двух этапов – разработки процедуры контроля состояния опор и надежного способа крепления верхней части лестницы на опору.

Результаты. На опоры, подверженные высокой степени загнивания, подъем персонала не может быть безопасным и в случае обнаружения таких проблем подъем на такую опору недопустим. В связи с этим, первым этапом работы на деревянных опорах ВЛЭ и ВЛС должна стать оценка степени их загнивания.

Нормативные требования охраны труда при проведении обходов и осмотров ВЛС и проводного вещания установлены в [22]. Помимо прочего в этом нормативном документе в качестве обязательной предусмотрена процедура контроля степени загнивания деревянных опор, согласно которой работник должен производить контроль степени загнивания по всей длине деревянных опор ВЛС. Наиболее распространенным методом проведения этой процедуры является визуальный осмотр и простукивание. Потенциально опасные участки можно выявлять на основании того, что гнилая древесина, в отличие от здоровой, целой древесины будет издавать глухой звук. К сожалению, при проведении данной процедуры велика роль человеческого фактора – процедура достаточно субъективна и в значительной мере зависит от опыта конкретного работника.

Эту проблему можно частично решить с помощью специальных приборов, например, уфимское предприятие ООО «Квазар» выпускает специальный прибор неразрушающего контроля АКОД (Аппаратура контроля опор деревянных). По сути, он является щупом для определения степени загнивания материала. Он предназначен для определения степени загнивания всех видов деревянных опор. Его использование необходимо своевременного выявления прогнивших участков в опорах и проведения регулярного объективного контроля их состояния. Определение твердости древесины с помощью этого прибора осуществляется за счет изменения степени сжатия тарированной пружины, к которой прикреплен стальной щуп в форме иглы. На основании этих данных можно определить степень загнивания древесины.

Проверка степени загнивания деревянной опоры с помощью АКОД тоже будет зависеть как от погрешности самого прибора, так и от человеческого фактора, например, квалификации работников, которые будут осуществлять соответствующий контроль. Тем не менее, использования АКОД значительно повышает объективность и точность контрольного осмотра деревянных опор.

Подъем на ненадежные опоры запрещен, однако, в ряде случаев могут возникнуть ситуации,

когда избежать этого не получается. Например, в труднодоступных районах к опоре может быть невозможно подъехать на автоподъемнике с люлькой и, в случае аварийной ситуации может возникнуть необходимость подъема на такую опору. В подобных случаях часто возникает необходимость применения путей подъема, предусматривающих снижение продольной нагрузки на опору для того, чтобы не провоцировать возможное падение опоры. Например, можно закреплять верхние части лестницы с помощью специальных приспособлений.

Одним из возможных решений данной проблемы может быть крепление лестницы с помощью опорных штанг. Это позволит снизить нагрузку на верхний конец опоры при подъеме на нее при помощи приставной лестницы. Для осуществления такого крепления была разработана универсальная насадка для верхней части лестницы, в которой для обеспечения устойчивости всей конструкции используются опорные штанги [23]. Такая насадка на лестницу позволит удерживать ее верхний край в надежном положении в независимости от степени самой опоры, что существенно снижает риск падения работника вместе с опорой и, соответственно, повышает безопасность работ.

На рисунках 2 и 3 представлена техническая схема осуществления предлагаемого способа. На рисунке 2 показан общий вид устройства в собранном виде, включающий схему для подъема на неустойчивые опоры с использованием разработанной насадки с опорными штангами. На рисунке 3 показана схема крепления насадки на верхнюю часть лестницы.

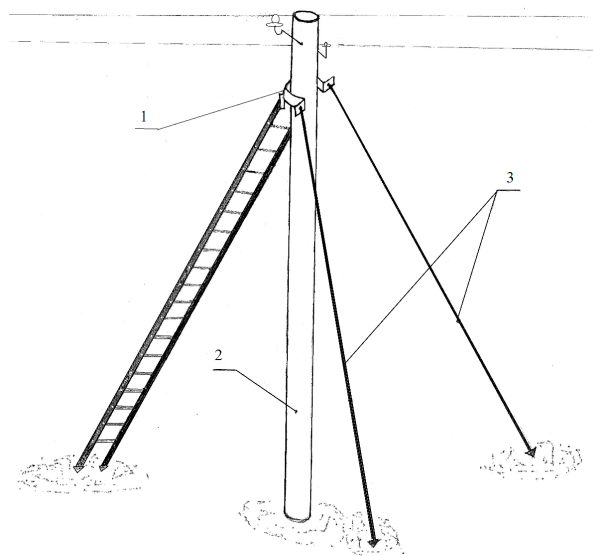


Рисунок 2 – Схема для подъема на неустойчивые опоры
(пояснения в тексте)

Перед использованием лестницы насадка 1 должна быть установлена и закреплена на ее верхнем крае (4). Перед началом работ насадка в обязательном порядке должна упираться в опору (2) в необходимом месте. Под воздействием нагрузки от лестницы шипы на внутренней части конструкции насадки входят в

зацепление с поверхностью опоры и не позволяют насадке вместе с лестницей соскальзывать с опоры. Опорные штанги (3) при этом должны упираться в землю по разные стороны от лестницы. Таким образом, конструкция насадки с использованием опорных штанг позволяет уменьшить боковую нагрузку на опору и тем самым снизить риск падения опоры.

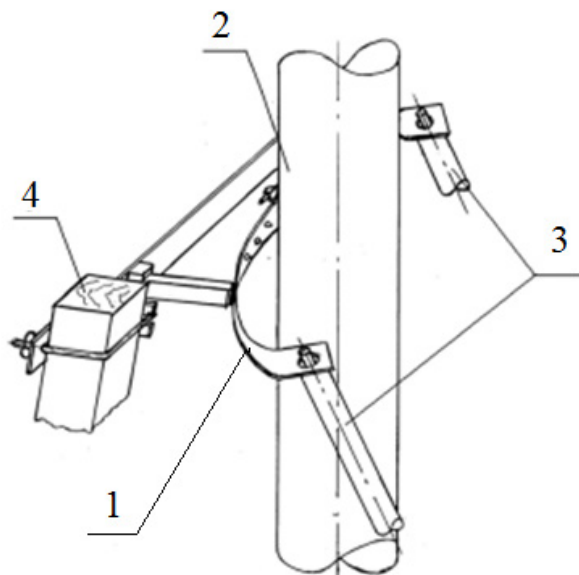


Рисунок 3 – Схема насадка на лестницу для подъема на неустойчивые опоры с опорными штангами (пояснения в тексте)

Обсуждение. Разработанная авторами насадка с опорными штангами относится к инженерному решению по обеспечению безопасности работ на неустойчивых опорах. В связи с тем, что существенными причинами травмирования работников при падении с приставных лестниц являются отсутствие креплений на опоре или скольжение лестницы по горизонтальной поверхности необходимость разработки подобных решений указывается во многих работах [5, 6, 7, 20, 21, 24, 25]. Например, показано [8], что одной из наиболее распространенных причин летальных смертельных случаев при падении с деревянных опор является неисправность или отсутствие устройств, осуществляющих надежное крепление приставных лестниц к опоре. Необходимо также уделять внимание материалам, из которых изготовлены лестницы, предназначенные для работы на опорах ВЛЭ и ВЛС – они должны обладать электроизоляционными свойствами [20].

Эффективность применения подобных инженерных решений может стать значительно выше, если его использовать в сочетании с другими мерами обеспечения безопасности при работе на высоте, как организационными, так и техническими. К техническим мерам обеспечения безопасной работы относятся, прежде всего, средства индивидуальной защиты (СИЗ) (например, спецодежда, каски, сигнальные жилетки и др.) [26, 27].

В ряде работ [12, 28-30] для повышения уровня безопасности проведения работ с электрооборудованием предлагают использовать современные высокотехнологические средства защиты, снабженные устройствами дополненной реальности и соответствующим программным обеспечением. Подобные устройства, без сомнения, могут помочь работнику не совершать критические ошибки, способные привести к несчастному случаю. Однако, для их эффективной работы необходима разработка интерфейса, понятного для всех возрастных категорий работников, в том числе и для лиц, старше 50-ти лет, наиболее подверженных производственному травматизму. Такие устройства должны быть способны к бесперебойной работе в автономном режиме на протяжении рабочей смены, что может быть затруднительно при проведении ремонтных работ на ВЛЭ в удаленных районах и сельской местности. Кроме того, на данный момент все предлагаемые на рынке варианты обладают высокой стоимостью, что может сделать их экономически невыгодными в условиях сельской местности [31, 32]. Однако, СИЗ, оснащенные устройствами дополненной реальности, не предотвращают случайные падения с высоты и не повышают устойчивость лестниц. Они просто увеличивают степень контроля работника над ситуацией, поэтому их использование целесообразно в совокупности с простыми механическими насадками, обеспечивающими большую устойчивость неустойчивых опор, поэтому их необходимо использовать в сочетании с простыми техническими решениями, подобными предлагаемому в настоящей работе.

Для работ на более высоких опорах необходимо использовать специальное канатное оборудование и анкерные крепления. Кроме того, в настоящее время активно разрабатываются автоматизированные технические средства, например, в работе [33] предлагается вспомогательный альпинистский робот для обслуживания опор ВЛЭ, основанный на бионическом принципе подъема. Его внедрение в перспективе позволит эффективно осуществлять подъем и повышает уровень безопасности работника.

Организационные меры, направленные на соблюдение правил безопасной работы, тоже достаточно существенны. Так, даже с использованием всех необходимых средств индивидуальной защиты нельзя проводить работы на высоте в неблагоприятных погодных условиях, таких как высокая скорость ветра, гроза или туман, обледенение конструкций [26], что зачастую усложняет быструю ликвидацию последствий аварийных ситуаций, которые при этом могут возникать. Во избежание травмирования третьих лиц необходимо, чтобы места работы на высоте должны быть огорожены, на конструкциях опор были установлены специальные цветовые маркеры [25].

Безопасность работ будет зависеть как от надежности самого инженерного решения, так и от

квалификации работников, ее использующих. В связи с этим, в ряде работ, посвященных обеспечению безопасности при работе на высоте, особо отмечается необходимость уделять дополнительное внимание организации и проведению инструктажей по охране труда при работе на высоте и контролю за их исполнением [5, 11, 25, 26, 34].

В настоящее время исследователями достаточно большое внимание уделяется разработке систем мониторинга безопасности и оценки риска с использованием современного программного обеспечения. Например, в работе [20] предлагается комплексная система оценки безопасности используемых лестниц, учитывающая более 10 различных факторов. В работе [6] представлена модель оценки риска возникновения травм с использованием средств искусственного интеллекта на основе статистики несчастных случаев при падении с высоты, произошедших в Китае за период с 2000 по 2020 год. В работе [7], на основании алгоритма глубокого обучения предлагается цифровая система мониторинга безопасности, которая автоматически оценивает все факторы риска, применимые для складных лестниц стремянок.

Очевидно, что для снижения уровня травматизма необходимо использовать все приведенные выше меры и средства обеспечения безопасности работ в зависимости от условий и видов работ.

К сожалению, универсального средства обеспечения безопасности работ на высоте на недостаточно устойчивых опорах с использованием приставных лестниц, не существует. В условиях сельских и отдаленных районов использование современных высокотехнологичных средств защиты, основанных на применении современных технических средств, может быть затруднено, поэтому разработка и внедрение простых технических средств, снижающих риск получения травм с тяжелым или летальным исходом долго будет актуальным.

Выводы. Для решения проблемы падения деревянной опоры вместе с работником во время осуществления ремонтных работ в электроэнергетике существуют различные технические решения, которые могут повысить уровень безопасности работ на неустойчивых и сомнительных опорах. Однако универсального эффективного технического решения для обеспечения полной безопасности таких работ не существует. Комплексный набор различных технических решений дает вариабельность в обеспечении безопасности труда. Следовательно, выявление и распространение знаний о наличии различных подходов в обеспечении безопасности труда при работе на неустойчивых и сомнительных опорах дает на выбор инструмент в обеспечении безопасности труда и тем самым ведет к снижению травматизма по данному риску. Предлагаемое в работе инженерное решение может помочь при решении данной проблемы на опорах ВЛС и ВЛЭ в сельской местности, где старые и потенциально опасные деревянные опоры наиболее распространены.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Extension-ladder safety: Solutions and knowledge gaps / Hsiao H., Simeonov P., Pizatella T., Stout N., Weeks J. // *International Journal of Industrial Ergonomics*. – 2008. – Vol. 38, Iss. 11-12. – Pp. 959-965. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2008.01.011>
2. Plinera E. Factors affecting fall severity from a ladder: Impact of climbing direction, gloves, gender and adaptation / Plinera E., Seo N. J., Beschorner K. E. // *Applied Ergonomics*. – 2017. – Vol. 60. – Pp. 163-170. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2016.11.011>
3. Danger at every rung: Epidemiology and outcomes of ICU-admitted ladder-related trauma / Ackland H.M., Pilcher D.V., Roodenburg O.S., McLellan S.A., Cameron P.A., Cooperab D.J. // *Injury*. – 2016. – Vol. 47, Iss. 5. – Pp. 1109-1117. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.injury.2015.12.016>
4. Häkkinen K.K. Experiments on safety in the use of portable ladders / Häkkinen K.K., Pesonen J., Rajamäki E. // *Journal of Occupational Accidents*. – 1988. – Vol. 10, Iss. 1. – Pp. 1-19. DOI: [https://doi.org/10.1016/0376-6349\(88\)90002-8](https://doi.org/10.1016/0376-6349(88)90002-8)
5. Kissiková L., Dluhoš I. Comprehensive evaluation of the work at height / Kissiková L., Dluhoš I. // *Acta Metallurgica Slovaca*. – 2018. – Vol. 24, № 1. – Pp. 100-106. DOI: 10.12776/ams.v24i1.1006
6. Xu, Q. Analysis of the Characteristics of Fatal Accidents in the Construction Industry in China Based on Statistical Data / Xu, Q.; Xu, K. // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. – 2021. Vol. 18. – 2162. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18042162>
7. Fall Prevention From Ladders Utilizing a Deep Learning-Based Height Assessment Method / Anjum S., Khan N., Khalid R., Khan M., Lee D., Park C. // *IEEE Access*. – 2022. – Vol. 10. – Pp. 36725-36742. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3164676
8. Wibowo T. Identifying causal factors of accidents related to working at height: a case study of a construction company / Wibowo T., Sukaryawan I. M., Hatmoko J.U.D. // *ICONETSI'20: Proceedings of the 2020 International Conference on Engineering and Information Technology for Sustainable Industry*. – 2020. – Article No.: 3. – Pp. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1145/3429789.3429792>
9. Effect of accident due to fall from height at construction sites in Malaysia / Zaini N.Z.M., Salleh M.A.M., Hasmoni M.F., Abas N.H. // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 498. – 2020. – 012106. DOI:10.1088/1755-1315/498/1/012106
10. Сенченко В.А. Меры безопасности при производстве работ на двускатных крышах / Сенченко В.А., Карауш С.А., Каверзнева Т.Т. // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура*. – 2017. – Т. 8, № 2. – С. 5–14. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.2.01
11. Ларина О.П. Обеспечение безопасности при выполнении строительно-монтажных работ на высоте. / Ларина О.П., Халабуда Е.И. // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. – 2019. – Т.9. № 4. – С. 734-741. DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2019-4-734-741>
12. Анализ аварийности и травматизма в электроэнергетике Российской Федерации / А.Б. Тряпицын, И.М. Кирпичникова, В.Ф. Бухтояров, Г.А. Круглов // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2018. – Т. 18, № 4. – С. 30–40. DOI: 10.14529/power180404
13. Быковская Л.В. Сравнительный анализ опор линий электропередачи. / Быковская Л.В., Штрамель А.В. // *Инновационная наука*. – 2022. – №4-2. – С.44-46
14. 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. – EDN: JXKPX
15. Жмуренков Ю.С. Опоры воздушных линий электропередач: назначение, виды, материалы / Жмуренков Ю.С., Шаменок В.П., Кулик А.Ю. // *Актуальные проблемы энергетики - 2017. Материалы Конференции*. – 2017. – С. 129-132.
16. Евсеев А.Е. Исследование несущей способности железобетонных призматических опор линий электропередач. / Евсеев А.Е., Евсеев И.А. // *Моделирование и механика конструкций*. 2020. С. 118-130.
17. Чущкина 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

18. Бочаров, Ю.Н. К вопросу о композитных опорах воздушных линий / Бочаров, Ю.Н., Жук В.В. // Труды Кольского научного центра РАН. Сер.: Энергетика. – 2012. – Вып. 4. – С. 78-85.

19. Приказ от 16 ноября 2020 года N 782н Об утверждении Правил по охране труда при работе на высоте. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573114692> (дата обращения 25.01.2024)

20. Georgeta B. Principles for the assessment of the safety requirements of work equipment for working at heights in electrical installations / Georgeta B., Constantin B. // MATEC Web of Conferences 290. – 2019. DOI: <https://doi.org/10.1051/matec-conf/201929012007>

21. Technical safety measures when performing works at heights on the stairs / Senchenko V.A., Pushenko S.L., Staseva E.V., Kvitkina M.V. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 913. – 2020. – 052042. DOI:10.1088/1757-899X/913/5/052042

22. Приказ от 7 декабря 2020 г. N 867н «Об утверждении правил по охране труда при выполнении работ на объектах связи». URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=380430> (дата обращения 25.01.2024)

23. Патент на полезную модель «Насадка на лестницу для подъема на неустойчивые опоры». Номер патента: 214240. Страна: Россия. Год: 2022. Дата регистрации: 18.10.2022. Номер заявки: 2021139652, Патентообладатель: ФГБОУВО «Томский государственный архитектурно – строительный университет», МПК: E06C 7/46.

24. Partridge R. A. Causes and patterns of injury from ladder falls / Partridge R. A., Virk A. S., Antosia R. E. // Academic Emergency Medicine – 1998. – Vol. 5. – №. 1. – Pp. 31–34. DOI: 10.1111/J.1553-2712.1998.TB02571.X.

25. Pham N.T. Improvement of The Safety Systems for Working at Heights on Transmission Towers / Pham N.T., Lelikov G., Korolchenko D. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 365. – 2018. – 042054 – DOI:10.1088/1757-899X/365/4/042054

26. Охрана труда при работах на высоте / Королев И.В., Завьялова А.А., Боровкова А.М., Звонкова Н.В. // Электроэнергия: передача и распределение. – 2019. – № 5(56). – С. 124-128.

27. Анализ аварийности и травматизма в электроэнергетике Российской Федерации / А.Б. Тряпицын, И.М. Кирпичникова, В.Ф. Бухтояров, Г.А. Крутлов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2018. – Т. 18, № 4. – С. 30–40. DOI: 10.14529/power180404

28. Precise haptic device co-location for visuohaptic augmented reality / U. Eck, F. Pankratz, C. Sandor et al. // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. – 2015. – No. 7521 (12). – P. 1427–1441. DOI: 10.1109/TVCG.2015.2480087

29. ARTab – using virtual and augmented reality method for an improved situation awareness for telemaintenance / D. Aschenbrenner, N. Maltry, J. Kimmel et al. // IFAC PapersOnLine. – 2016. – No. 49 (30). – P. 204–209. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.11.168

30. Combining visual natural markers and IMU for improved AR based indoor navigation / M. Neges, C. Koch, M. König, M. Abramovici // Advanced Engineering Informatics. – 2017. – No. 31. – P. 18–31. DOI: 10.1016/j.aei.2015.10.005

31. A freeze-object interaction technique for handheld augmented reality systems / H. Arshad, S.A. Chowdhury, L.M. Chun et al. // Multimedia Tools and Applications. – 2016. – No. 75 (10). – P. 5819–5839. DOI: 10.1007/s11042-015-2543-3

32. Пирогова, М.А. Дополненная реальность в системах промышленного интернета вещей: носимые устройства конечного пользователя / М.А. Пирогова, И.Е. Лешихина, В.А. Краюшкин // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2018. – № 2 (170). – С. 37–42.

33. Tian J. Design of climbing robot for power transmission tower maintenance / Tian J., Liu Q., Yuan K. // Journal of Physics: Conference Series, 1757. – 2021. – 012153. DOI:10.1088/1742-6596/1757/1/012153

34. Комплексный подход к обеспечению безопасности работ на высоте // Электроэнергия: передача и распределение. – 2020. – № 5(62). – С. 90-93.

Статья поступила в редакцию 28.01.2024

Статья принята к публикации 15.03.2024

УДК 614.84

EDN: PFGIOG

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ РАННЕГО ОБНАРУЖЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

© Автор(ы) 2024

SPIN: 5350-3579

AuthorID: 689956

ORCID: 0000-0002-8325-1598

Scopus ID: 57204675457

БОГДАНОВ Андрей Владимирович, доктор технических наук,
профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности»

*Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)
(454080, Россия, Челябинск, пр. Ленина, 76, e-mail: bav-64@mail.ru)*

СУЛЕЙМАНОВ Игорь Эдуардович, магистрант кафедры «Безопасность жизнедеятельности»

*Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)
(454021, Россия, Челябинск, 40-летия Победы, 15, e-mail: iesulejmanov@gmail.com)*

Аннотация. В настоящее время вопрос охраны лесов от всевозможных пожаров является крайне актуальным. Несмотря на высокий уровень развития лесной отрасли и многочисленное количество современных технических средств, а также различных передовых систем для ведения лесного хозяйства, обеспечить в полной мере охрану лесов от пожаров не представляется возможным. Наземный метод раннего обнаружения пожара с помощью видеокамер кругового обзора позволяет решить данную проблему. Камеры ведут круглосуточное наблюдение за состоянием леса, а также охватывают большие территории, в следствии чего способны обнаруживать возгорание в любое время суток. При этом минимизация человеческих ресурсов позволяет снизить затраты при повышении качества наблюдения. За несколькими мониторами, подключенными к видеокамерам, может наблюдать один человек. Тем не менее, до сих пор присутствуют сложности определения контролируемой площади системы раннего обнаружения пожара при заданном числе камер. Поэтому авторами статьи разработана математическая модель, которая позволяет определить площадь контролируемой территории, зная количество камер по длине и ширине территории, а также дальность наблюдения видеокамер. Практическое применение полученной математической модели позволит осуществлять надежный контроль с исключением «слепых» зон.

Ключевые слова: система раннего обнаружения пожара, дальность наблюдения видеокамеры, площадь контролируемой территории.

JUSTIFICATION OF THE PARAMETERS OF THE FOREST FIRES EARLY DETECTION SYSTEM

© The Author(s) 2024

BOGDANOV Andrey Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor of the Department of Life Safety
South Ural State University (National Research University)

(76 Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Russia, e-mail: bav-64@mail.ru)

SULEYMANOV Igor Eduardovich, master's student of the Department of Life Safety
South Ural State University (National Research University)

(40th anniversary of Victory, 15, Chelyabinsk, 454021, Russia, e-mail: iesulejmanov@gmail.com)

Abstract. Currently, the issue of protecting forests from all kinds of fires is extremely relevant. Despite the high level of development of the forestry industry and the numerous modern technical means, as well as various advanced systems for forest management, it is not possible to fully protect forests from fires. The ground-based method of early fire detection using circular video cameras allows us to solve this problem. The cameras monitor the state of the forest around the clock and also cover large areas, as a result of which they are able to detect a fire at any time of the day. At the same time, minimizing human resources allows reducing costs while increasing the quality of observation. Multiple monitors connected to video cameras can be monitored by one person. However, there are still difficulties in determining the controlled area of an early fire detection system for a given number of cameras. Therefore, the authors of the article have developed a mathematical model that allows us to determine the area of the controlled territory, knowing the number of cameras along the length and width of the territory, as well as the observation range of video cameras. The practical application of the resulting mathematical model will allow for reliable control with the exception of "blind" spots.

Keywords: early fire detection system, camera surveillance range, area of controlled territory.

Для цитирования: Богданов А.В. Обоснование параметров системы раннего обнаружения лесных пожаров / А.В. Богданов, И.Э. Сулейманов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 1(65). – С. 152-156. – EDN: PFGIOG.

Введение. Лесные пожары в Российской Федерации охватывают значительные территории [1-5]. В целом по годам наблюдается тенденция увеличения площади возгорания [6-10]. При приближении к населенным пунктам, лесные пожары приводят к уничтожению не только жилых домов,

сельскохозяйственных угодий, но и школ, больниц, опор линий связи и электропередачи, элементов трубопроводов транспорта, складов и хранилищ [11-14]. В результате чего нарушается хозяйственная деятельность значительных территорий. Поэтому проблема своевременного обнаружения лесных пожаров является актуальной. Как показывает анализ систем обнаружения пожаров, наиболее перспективным и экономичным является наземное наблюдение, которое можно осуществлять с применением видеокамер [15-17]. Но данные системы наблюдения требуют обоснования их параметров.

Методология. Целью данной работы является обоснование параметров системы раннего обнару-

жения лесных пожаров, а именно количества видеокамер, необходимых для контролируемой территории. Для достижения поставленной цели определим площадь территории, контролируемой видеокамерами при расположении их прямоугольной сеткой размера $M \cdot N$ (рис. 1) без «слепых» зон (N – столбцы, M – строки). На рисунке 1 точками в окружностях обозначены видеокамеры, а круги представляют собой площади, контролируемые каждой видеокамерой.

При рассматриваемом способе размещения исключаются «слепые» зоны. При этом образуются сегменты (обозначены штриховкой), являющиеся результатом пересечения окружностей (рис. 2).

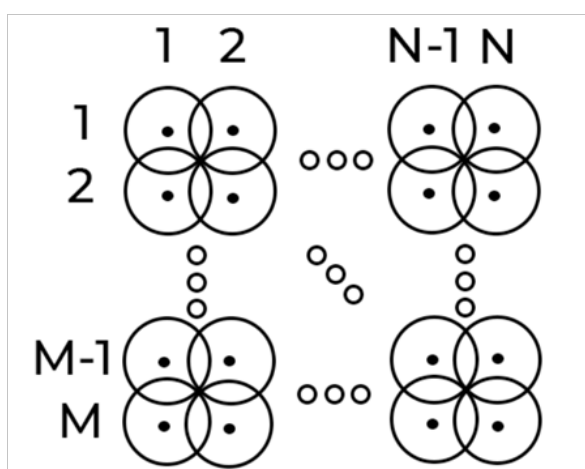


Рисунок 1 – Общая схема расположения камер и области их видимости

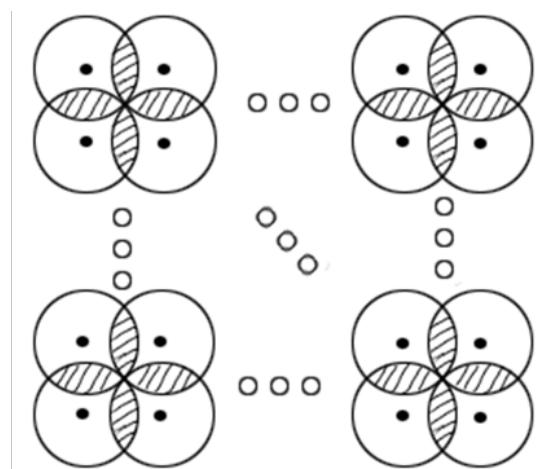


Рисунок 2 – Площади сегментов, образованные пересечением окружностей

Таким образом, площадь территории, контролируемой видеокамерами, можно определить из рисунка 2:

$$S_{\text{территории}} = S_{\text{общая}} - S_o, \quad (1)$$

где $S_{\text{территории}}$ – общая площадь территории, контролируемой видеокамерами, м^2 ; $S_{\text{общая}}$ – площадь видимости всех камер (площадь всех кругов), м^2 ; S_o – площадь всех сегментов, образованных пересечением окружностей, м^2 .

Общая площадь видимости всех камер (площадь кругов) также можно определить из рисунка 2:

$$S_{\text{общая}} = \pi r^2 \cdot N \cdot M, \quad (2)$$

где N – количество внешних камер, расположенных по вертикали, шт.; M – количество внешних камер, расположенных по горизонтали, шт.; r – радиус окружности (радиус зоны наблюдения или дальность наблюдения каждой видеокамеры), м.

Для расчета площади сегментов, разделим их на две группы (рис. 3). Внешние – обозначены наклонной штриховкой, внутренние – обозначены горизонтальной и вертикальной штриховкой.

При таком разделении (рис. 3) общее количество сегментов определяется как:

$$n_o = n_{\text{внешние}} + n_{\text{внутренние}}, \quad (3)$$

где n_o – общее количество внешних и внутренних сегментов, шт.; $n_{\text{внешние}}$ – количество внешних

сегментов, шт.; $n_{\text{внутренние}}$ – количество внутренних сегментов, шт.

Сначала найдем количество внешних сегментов (рис. 3):

$$n_{\text{внешние}} = 2 \cdot (N-1) + 2 \cdot (M-1). \quad (4)$$

При определении количества внутренних сегментов обратим внимание на то, что в области видимости любой внутренней камеры присутствует четыре сегмента (рис. 4).

Если предположить, что все камеры имели бы по четыре сегмента, то их количество $n_{\text{сегм}}$ можно определить по следующему выражению:

$$n_{\text{сегм}} = 4 \cdot N_{\text{внутр.кам}}, \quad (5)$$

где $N_{\text{внутр.кам}}$ – общее количество внутренних камер, шт.

При этом, количество внутренних камер $N_{\text{внутр.кам}}$ можно найти по следующему выражению:

$$N_{\text{внутр.кам}} = N_{\text{внутр}} \cdot M_{\text{внутр}}, \quad (6)$$

где $N_{\text{внутр}}$ – количество внутренних камер одного столбца, расположенных по вертикали, шт.; $M_{\text{внутр}}$ – количество внутренних камер одной строки, расположенных по горизонтали, шт.

Из рисунков 3 и 4 видно, что количество внутренних камер по горизонтали и вертикали будет на две меньше, чем внешних. Поэтому при определении их количества необходимо из общего числа камер по

горизонталь и вертикаль вычтут по две камеры:

$$N_{\text{внутр}} = (N-2), \quad (7)$$

$$M_{\text{внутр}} = (M-2). \quad (8)$$

Заметим, что внутренние (вертикальная штриховка) сегменты будут всегда располагаться по периметру внутренней фигуры (рис. 5).

Тогда их количество определится как:

$$n_{\text{периметр}} = 2 \cdot N_{\text{внутр}} + 2 \cdot M_{\text{внутр}}, \quad (9)$$

где $n_{\text{периметр}}$ – количество внутренних (вертикальная штриховка) сегментов по периметру внутренней фигуры, шт.

Умножение на 2 в формуле (9) обусловлено учетом нижней и верхней строки, а также левого и правого столбца (рис. 5).

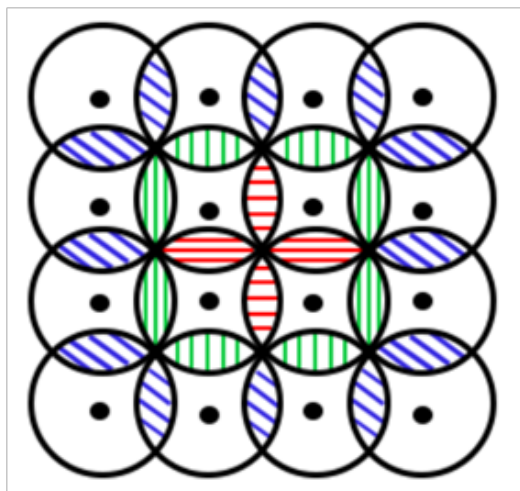


Рисунок 3 – Внешние и внутренние сегменты

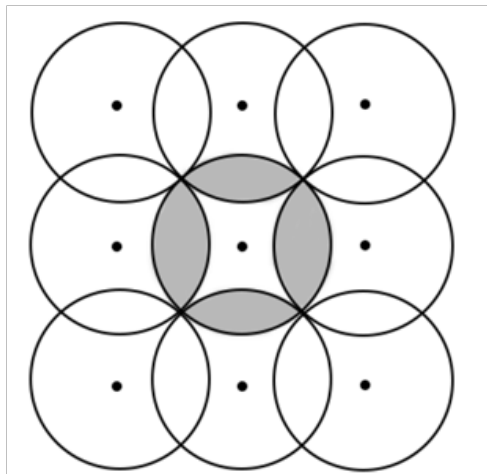


Рисунок 4 – Пример расположения видеокамеры во внутренней области

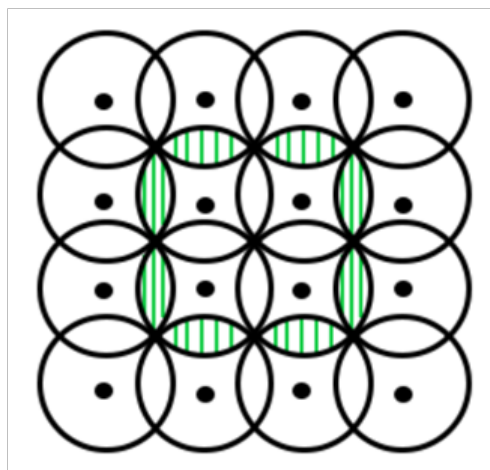


Рисунок 5 – Сегменты, расположенные по периметру внутренней фигуры

Принятое расположение камер приводит к пересечению областей видимости, из-за чего в формуле (5) внутренние (горизонтальная штриховка) сегменты мы учитываем дважды, а внутренние (вертикальная штриховка) лишь один раз (рис. 3). Для удобства дальнейших вычислений будем учитывать внутренние (вертикальная штриховка) сегменты, представленные на рисунке 3, также дважды, чтобы при окончательном подсчете поделить их на 2 для нахождения реального количества сегментов:

$$n_{\text{внутренние}} = (n_{\text{сегм}} + n_{\text{периметр}}) / 2. \quad (10)$$

Подставляя в формулу 10 выражения (5) и (9), найдём количество всех внутренних (вертикальных и горизонтальных) сегментов $n_{\text{внутренние}}$:

$$n_{\text{внутренние}} = \frac{4 \cdot N_{\text{внутр.кам}} + 2 \cdot N_{\text{внутр}} + 2 \cdot M_{\text{внутр}}}{2} = 2 \cdot N_{\text{внутр.кам}} + N_{\text{внутр}} + M_{\text{внутр}}. \quad (11)$$

С учётом уравнения (6) формула (11) примет вид:

$$n_{\text{внутренние}} = 2 \cdot N_{\text{внутр}} \cdot M_{\text{внутр}} + N_{\text{внутр}} + M_{\text{внутр}}. \quad (12)$$

По полученному выражению (12) можно определить количество внутренних сегментов, являющихся пересечением областей видимости камер (пересечением окружностей, представленных на рисунке 3). Тогда по формуле (3), с учетом равенств (4) и (12), найдём общее число сегментов n_o :

$$n_o = 2 \cdot (N-1) + 2 \cdot (M-1) + 2 \cdot N_{\text{внутр}} \cdot M_{\text{внутр}} + N_{\text{внутр}} + M_{\text{внутр}}. \quad (13)$$

После преобразований выражения (13) с учетом равенств (7) и (8), получим:

$$n_o = 2 \cdot N \cdot M - N - M. \quad (14)$$

Зная количество сегментов, определим их общую площадь S_o , образованную пересечением областей видимости камер (пересечением окружностей, представленных на рисунке 3):

$$S_o = n_o \cdot S_{\text{сегм}}. \quad (15)$$

Результаты. Таким образом, с учётом уравнений (1), (2), (15) площадь территории, контролируемой видеокамерами за вычетом площади сегментов, примет вид:

$$S_{\text{территории}} = \pi r^2 \cdot N \cdot M - n_o \cdot S_{\text{сегм.}} \quad (16)$$

С учётом уравнения (14), формула (16) примет вид:

$$S_{\text{территории}} = \pi r^2 \cdot N \cdot M - (2 \cdot N \cdot M - N - M) \cdot S_{\text{сегм.}} \quad (17)$$

В полученном выражении (17) неизвестна площадь сегментов $S_{\text{сегм.}}$, которую можно найти по существующему выражению [15]:

$$S_{\text{сегм.}} = r^2 (\pi/2 - I). \quad (18)$$

Тогда выражение (17), с учетом выражения (18), примет следующий вид:

$$S_{\text{территории}} = \pi r^2 \cdot N \cdot M - (2 \cdot N \cdot M - N - M) \cdot r^2 (\pi/2 - I). \quad (19)$$

Из полученного выражения (19) следует, что площадь территории $S_{\text{территории}}$, контролируемой видеокамерами, зависит от квадрата дальности наблюдения видеокамеры r и количества камер, расположенных по вертикали и горизонтали контролируемого участка.

Для контроля территории без «слепых» зон должно соблюдаться расстояние между камерами $O_1 O_2$, которое можно определить по следующему выражению [15]:

$$O_1 O_2 = \sqrt{2} \cdot r. \quad (20)$$

С учетом выражений (19) и (20) запишем следующую систему:

$$\begin{cases} S_{\text{территории}} = \pi r^2 \cdot N \cdot M - (2 \cdot N \cdot M - N - M) \cdot r^2 (\frac{\pi}{2} - I) \\ O_1 O_2 = \sqrt{2} \cdot r \end{cases} \quad (21)$$

Обсуждение. Полученная математическая модель (21) позволяет определить площадь контролируемой территории, где видеокамеры расположены прямоугольной сеткой. То есть, для расчета по математической модели (21) необходимо и достаточно знать количество камер по длине и ширине контролируемой территории, а также дальность наблюдения видеокамеры.

Выводы. Таким образом, данный подход к определению площади контролируемой территории, на которой возможно возникновение пожара, позволит рационально распределять видеокамеры кругового обзора (панорамные видеокамеры). Это положительно отразится на быстром обнаружении пожара и его дальнейшем устранении. Практическое применение разработанной математической модели (21) позволит обосновать параметры системы раннего обнаружения лесных пожаров для осуществления надежного контроля возникновения пожара с исключением «слепых» зон на контролируемой территории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- Куликович, А.В. Экологические последствия чрезвычайных ситуаций: учебное пособие / А.В. Куликович, С.А. Панихидников. – Санкт-Петербург: СПбГУТ им. М.А. Бонч-Бруевича, 2021. – 126 с. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/180025> (дата обращения: 12.02.2024). – Режим доступа: для авториз. пользователей.
- Проблемы устойчивости развития социально-экономических систем: материалы Международной научно-практической конференции. 24 ноября 2022 г.: материалы

конференции / ответственные редакторы А.А. Бурмистрова [и др.]. – Тамбов: ТГУ им. Г.Р.Державина, 2022. – 712 с. – ISBN 978-5-00078-682-6. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/331259> (дата обращения: 12.02.2024). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

3. Амелъугуов С.П. Горение древесины при пожаре: учебно-методическое пособие / С.П. Амелъугуов, Р.Г. Шубкин. – Железногорск: СПСА, 2021. – 82 с. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/170685> (дата обращения: 12.02.2024). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

4. Смирнов, А.П. Охрана и защита лесов. Лесные пожары: учебное пособие для СПО / А.П. Смирнов, А.А. Смирнов. – 3-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 124 с. – ISBN 978-5-507-44170-9. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/215765> (дата обращения: 12.02.2024). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

5. Смирнов А.П. Введение в лесную пирологию / А.П. Смирнов, А.А. Смирнов. – Санкт-Петербург: Лань, 2023. – 84 с. – ISBN 978-5-507-45981-0. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/319346> (дата обращения: 09.02.2024). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

6. Смирнов А.П. Лесная пирология: учебное пособие / А.П. Смирнов; под редакцией Е.Н. Кузнецова. – Санкт-Петербург: СПбГУТУ, 2021. – 136 с. – ISBN 978-5-9239-1227-2. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/179188> (дата обращения: 12.02.2024). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

7. Ложкина, О.В. Анализ влияния изменения климата на природные пожары на примере Российской Федерации и ряда зарубежных стран / О.В. Ложкина, С.В. Орловцев, А.Г. Савинов // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2022. – № 4. – С. 111-121. – ISSN 1998-8990. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/journal/issue/347840> (дата обращения: 12.02.2024). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

8. Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий: официальный сайт. – 2024. – URL: <https://mchs.gov.ru/> (дата обращения: 12.02.2024). – Текст: электронный.

9. Сомова Ю.В. Охрана труда. Прогнозирование опасных и вредных производственных факторов: учебное пособие / Ю.В. Сомова, Т.В. Свиридова. – Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2023. – 114 с. – ISBN 978-5-9967-2741-4. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/366038> (дата обращения: 12.02.2024). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

10. Краткий курс лекций по дисциплине «Производственная и пожарная автоматика»: учебное пособие / А.В. Антонов, Е.И. Голякова, И.В. Сацук, А.П. Филкова. – Железногорск: СПСА, 2023. – 296 с. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/331418> (дата обращения: 12.02.2024). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

11. Смирнов А.П. Введение в лесную пирологию / А.П. Смирнов, А.А. Смирнов. – Санкт-Петербург: Лань, 2023. – 84 с. – ISBN 978-5-507-45981-0. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/319346> (дата обращения: 12.02.2024). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

12. Опасные ситуации природного характера и защита от них: учебное пособие / составитель В.М. Иванов. – Ставрополь: СКФУ, 2016. – 170 с. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/155138> (дата обращения: 12.02.2024). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

13. Иванов В.А. Лесное пожароуправление: практикум: учебное пособие / В.А. Иванов, Л.В. Буряк, С.А. Москальченко. – Красноярск: СибГУ им. академика М. Ф. Решетнёва, 2022. – 92 с. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/269975> (дата обращения: 12.02.2024). – Режим

доступа: для авториз. пользователей.

14. Модели и методы эколого-экономической оценки продуктивности лесных территорий с учетом уровня развития транспортной сети: монография / И.М. Еналеева-Бандура, Р.Н. Ковалев, А.Н. Баранов, Н.Н. Шишоркин. – Красноярск: СибГУ им. академика М.Ф. Решетнёва, 2022. – 162 с. – ISBN 978-5-86433-905-3. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/269963> (дата обращения: 12.02.2024). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

15. Богданов А.В. Определение площади, контролируемой видеокамерами системы раннего обнаружения пожара // А.В. Богданов, Г.А. Полунин, Ю.С. Козлова // Сибирский пожарно-спасательный вестник. – 2022. № 4 (27). – С. 20-25. – http://vestnik.sibpsa.ru/wp-content/uploads/2022/v4/N27_20-25.pdf (дата обращения: 12.02.2024). doi: 10.34987/vestnik.sibpsa.2022.38.87.006.

16. Сулейманов И.Э. Анализ статистических данных по лесным пожарам / И.Э. Сулейманов // Безопасность жизнедеятельности глазами молодежи: сборник материалов VII Всероссийской студенческой конференции (с международным участием). – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2023. – С. 222-225.

17. Богданов А.В. Анализ систем обнаружения лесных пожаров / А.В. Богданов, И.Э. Сулейманов // Безопасность жизнедеятельности глазами молодежи. Сборник материалов VII Всероссийской студенческой конференции (с международным участием). – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2023. – С. 125-129.

Статья поступила в редакцию 16.01.2024

Статья принята к публикации 15.03.2024

УДК 504.06

EDN: TYWZDO

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ НЕЙТРАЛИЗАТОРА ТОКСИЧНЫХ КОМПОНЕНТОВ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ОКИСЛОВ АЗОТА В ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ

© Автор(ы) 2024

SPIN: 1903-8678

AuthorID: 672388

ORCID: 0000-0002-2044-8545

БАЛАНДИНА Ольга Александровна, старший преподаватель
кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция»*Самарский государственный технический университет**(443100, Российская Федерация, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, e-mail: balandinaolya88@rambler.ru)*

Аннотация. Окислы азота являются важной категорией загрязнителей атмосферного воздуха. В работе представлены результаты анализа перспектив использования нейтрализатора токсичных компонентов дымовых газов, применяемого с целью снижения уровня выбросов окислов азота от энергетического оборудования теплоснабжающих предприятий. Предложенный метод снижения окислов азота в воздушной среде основан на применении устройства для очистки дымовых газов, включающего нанесенный катализатор, содержащий 0,5% активной Pt . При этом, восстановитель NO_x вырабатывается самостоятельно в процессе сжигания природного газа, при отсутствии дополнительных затрат и без внешней обработки. Проведенные исследования позволили выявить возможность применения нейтрализатора токсичных компонентов дымовых газов без введения внешнего реагента не только для водогрейных котлов высокой производительности, но и для парогенераторов, производительность которых превышает 50 т/ч. Результаты расчета, исходными данными для которых являлись эксплуатационные характеристики действующего типового энергетического оборудования, выявили снижение концентрации окислов азота до 94% в пределах нагрузки котла до $0,85D_{max}$, т/ч. В связи с тем, что теплоснабжающие предприятия территориально располагаются в черте жилого массива, либо в непосредственной близости от него, задача газоочистки является одной из приоритетных с точки зрения экологической безопасности производства тепловой и электрической энергии, а применение предложенного устройства для очистки дымовых газов может способствовать обеспечению необходимого уровня снижения выбросов окислов азота.

Ключевые слова: очистка, воздух, выбросы, загрязнение, нейтрализация, окислы азота, теплоснабжающее предприятие, катализатор, котельные установки, дымовые газы.

ASSESSMENT OF THE EFFECTIVENESS OF A NEUTRALIZER FOR TOXIC COMPONENTS OF FLUE GASES FOR REDUCING THE CONTENT OF NITROGEN OXIDES IN THE AIR ENVIRONMENT

© The Author(s) 2024

BALANDINA Olga Alexandrovna, senior lecturer at the Department «Heat and gas supply and ventilation»
*Samara State Technical University**(443100, Russian Federation, Samara, str. Molodogvardeyskaya, 244, e-mail: balandinaolya88@rambler.ru)*

Abstract. Nitrogen oxides are an important category of air pollutants. The paper presents the results of an analysis of the prospects for using a neutralizer of toxic flue gas components used to reduce nitrogen oxide emissions from power equipment of heat supply enterprises. The proposed method for reducing nitrogen oxides in the air is based on the use of a device for cleaning flue gases, including a deposited catalyst containing 0.5% active Pt . At the same time, the NO_x reducing agent is produced independently during the combustion of natural gas, in the absence of additional costs and without external processing. The conducted studies have revealed the possibility of using a neutralizer of toxic flue gas components without the introduction of an external reagent not only for high-performance hot water boilers, but also for steam generators with a capacity exceeding 50 t/h. The calculation results, the initial data for which were the operational characteristics of the current standard power equipment, revealed a decrease in the concentration of nitrogen oxides to 94% within the boiler load to $0,85D_{max}$ t/h. Due to the fact that heat supply enterprises are geographically located within a residential area, or in close proximity to it, the task of gas purification is one of the priorities from the point of view of environmental safety of heat and electric energy production, and the use of the proposed device for flue gas purification can help ensure the necessary level of reduction of nitrogen oxide emissions.

Keywords: cleaning, air, emissions, pollution, neutralization, nitrogen oxides, heat supply company, catalyst, boiler installations, flue gases.

Для цитирования: Баландина О.А. Оценка эффективности нейтрализатора токсичных компонентов дымовых газов для снижения содержания окислов азота в воздушной среде / О.А. Баландина // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 1(65). – С. 157-163. – EDN: TYWZDO.

Введение. В 2022 году, согласно государственно-среде Российской Федерации», опубликованному му докладу «О состоянии и об охране окружающей министерством природных ресурсов и экологии

Российской Федерации, было зафиксировано 17174 тысячи тонн выбросов от стационарных источников. Среди основных видов экономической деятельности обеспечение электрической энергией, газом и паром находится на третьем месте и составляет 18,1% общего объема выбросов вредных веществ [1]. Тепловые электростанции обеспечивают выработку около 70% электроэнергии в стране и более 34% тепла, при отпуске пара и горячей воды в централизованные системы теплоснабжения [2]. Существуют различные подходы и инновации, нацеленные на уменьшение выбросов загрязняющих веществ [3-5], однако так как основным топливом, используемом на теплоэлектростанциях, являются углеводороды, проблема загрязнения атмосферного воздуха остается актуальной. При этом более трети общего объема выбросов вредных веществ на ТЭС приходится на окислы азота, являющиеся одним из наиболее опасных компонентов дымовых газов [6,7]. Отравление окислами азота проявляется в виде раздражения респираторной системы, интенсивного кашля, головных болей и может привести к отеку легких [8].

Большинство окислов азота возникает из-за процессов, происходящих при высоких температурах и в условиях быстрого окисления азота. Уровень эмиссии NO_x в значительной мере зависит от соотношения компонентов смеси для горения и температуры в области, где происходит сгорание [9].

К технологиям понижения содержания NO_x в выбросах дымовых газов относятся методы избирательного каталитического и некаталитического восстановления, причем в обоих случаях обычно используют аммиак или мочевины в качестве восстановителя [10-12]. Проблема данных технологий заключается в том, что использование избыточных количеств восстановителей для достижения высокого уровня нейтрализации NO_x приводит к опасным выделениям аммиака в окружающую среду. Кроме того, системы, задействованные в инъекции и обработке аммиака, приводят к существенным затратам, как в плане первоначальных инвестиций, так и в контексте последующего обслуживания. Также использование аммиака влечет за собой потенциальную опасность для персонала, обеспечивающего его эксплуатацию, а образующиеся соли аммония могут вызывать коррозию поверхностей газохода [13,14]. С учетом данных факторов и стесненных условий компоновки котельных цехов, одной из перспективных технологий нейтрализации NO_x является избирательная каталитическая нейтрализация. Нанесенные керамические гетерогенные катализаторы на основе платины, обеспечивают снижение уровня вредных выбросов за счет реакций, протекающих на их поверхности [15-17]. В этой связи актуальным направлением является расширение технологической возможности применения модифицированного устройства, которое может быть встроено в действующую

систему газозвдушного тракта эксплуатируемого оборудования, для снижения содержания окислов азота в выбросах дымовых газов.

Методология. Задача создания способа снижения выбросов окислов азота, не приводящего к увеличению уровня выделения других загрязнителей и при этом не требующего использования внешнего реагента, рассматривалась в ранее опубликованных трудах автора [18,19]. В качестве варианта решения данной задачи было предложено, а также апробировано применительно к энергокотлам ТЭЦ Волжского автозавода филиала «Самарский» ПАО «Т Плюс», устройство для очистки дымовых газов [19,20].

При этом расчеты уровня снижения выбросов [9,20] проводились по эксплуатационным характеристикам типового водогрейного котла (ТГМЕ-464) при варьировании нагрузки агрегата от 220 до 500 т/ч. Полученные в результате проведенных исследований данные, позволили установить степень очистки выбросов от окислов азота до 94% [9,21].

Цель работы – исследовать возможность применения нейтрализатора токсичных компонентов дымовых газов без введения внешнего реагента для паровых котлов, паропроизводительностью 50 т/ч и выше, с целью определения универсальности предложенного устройства [9].

Устройство для нейтрализации токсичных компонентов дымовых газов без введения внешнего реагента [9], представляет участок газохода со встроенной секцией катализатора блочной структуры (рис. 1).

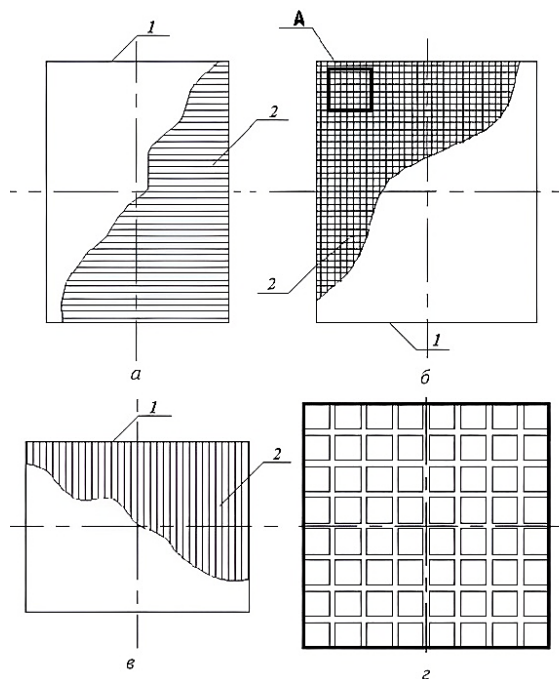
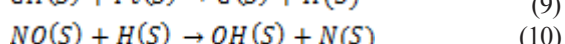
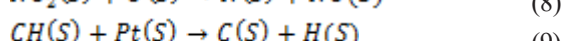
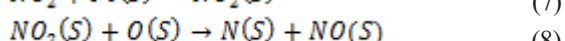
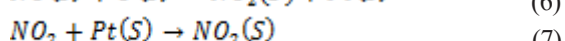
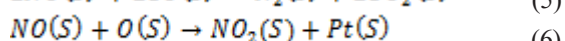
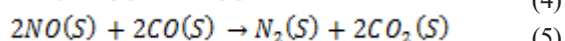
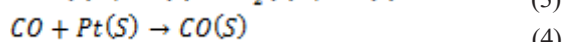
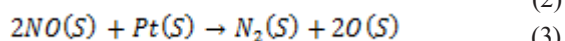


Рисунок 1 – Конструкция устройства каталитического модуля очистки дымовых газов: а – вид справа; б – фронтальный вид; в – вид сверху; г – фрагмент А (пример формирования каналов – увеличенный вид М5:1); 1 – блок; 2 – монолитный носитель с параллельными непересекающимися каналами

Равномерно распределенное каталитически активное вещество в виде платины нанесено на монокристаллические блоки, формирующие каналы квадратного сечения размером 8 x 8 мм. Восстановителем окислов азота выступает оксид углерода $CO(S)$, образующийся в процессе сжигания природного газа, что исключает необходимость дополнительных затрат на обработку, хранение, нагнетание и инъекцию внешнего реагента.

Реакции на поверхности каталитического модуля представляют собой взаимодействие NO с оксидом углерода и атомарным кислородом на поверхности ячеек (S) [9,20]:



Предлагается смонтировать устройство для очистки дымовых газов в участок газохода от котельного агрегата типа НЗЛ-110, входящего

в состав энергооборудования Самарской ГРЭС филиала «Самарский» ПАО «Т Плюс» [22,23]. Паропроизводительность данного котельного агрегата не превышает 110 т/ч, что позволит оценить эффективность очистки дымовых газов в эксплуатационных условиях более низких нагрузок, по сравнению с рассмотренным в работе [20] агрегатом ТГМЕ-464 высокой паропроизводительности. Дымовые газы, образовавшиеся после сжигания газообразного топлива, через газоход попадают в пароперегреватель, после которого направляются на очистку в блок реактора нейтрализатора, а далее через дымовую трубу выбрасываются в атмосферу. На агрегате в рамках реконструкции в 1975 – 1977 гг. была смонтирована схема вторичного дутья, предназначенная для снижения выбросов окислов азота. Схема включает три воздушных сопла, установленные на фронтальной стене выше горелочных устройств. Подводящие воздуховоды к соплам врезаны в воздуховоды горячего воздуха. Перед соплами установлены регулирующие шиберы с ручным управлением [23]. Однако результаты балансовых испытаний (рис. 2) свидетельствуют о недостаточности принятых мер, так как при увеличении производительности котла свыше 78 т/ч, значения концентрации окислов азота в дымовых газах превышают рекомендованные наибольшие допустимые значения (255 мг/м³) [24,25].

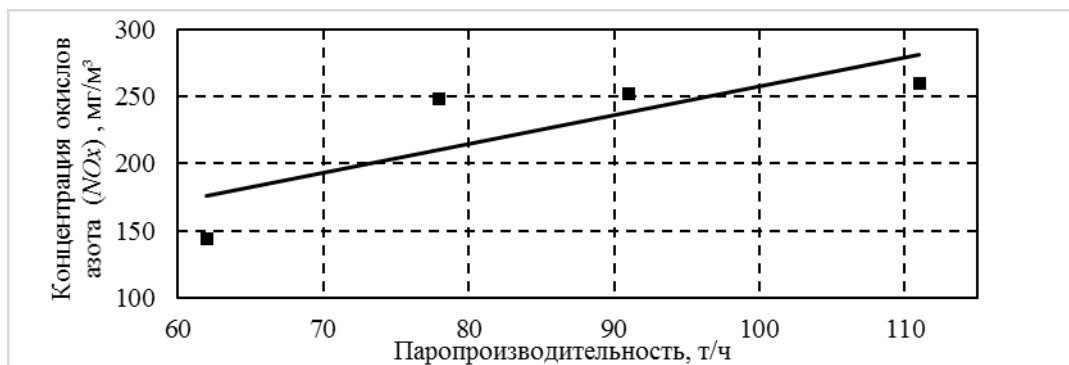


Рисунок 2 – Зависимость концентрации окислов азота в дымовых газах при варьировании нагрузки котла НЗЛ-110 (топливо – природный газ)

Расчет эффективности устройства для очистки дымовых газов выполнялся с использованием математической модели, описывающей изменение концентрации NO на поверхности катализатора в условиях дифференцирования газового тракта по длине на участки с постоянными значениями температур [19]:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial C^{NOx}}{\partial h} &= \frac{\sum_{m=1}^z k_m \cdot C_k^{NOx}}{v}, \\ \frac{\partial T}{\partial h} &= \frac{\sum_{m=1}^z k_m \cdot C_k^{NOx} \cdot q_m}{v \cdot c_p}, \\ \frac{\partial C^{NOx}}{\partial \tau} &= \beta \cdot (C_p^{NOx} - C_k^{NOx}) \cdot s, \\ \sum_{m=1}^z k_m \cdot C_k^{NOx} \cdot q_m &= \alpha \cdot (T_p - T_k) \cdot s. \end{aligned} \right. \quad (11)$$

где τ – время протекания реакции, с; h – толщина

слоя катализатора, м; C_p^{NOx} , C_k^{NOx} – концентрации NO_x в потоке выбросов и на поверхности катализатора, соответственно, кмоль/м³; k_m – константа реакционной скорости м, с⁻¹; z – число реакций; v – скорость движения выбросов в сечении катализатора, м/с; c_p – удельная изобарная теплоемкость потока газа, кДж/(м³·К); β – коэффициент массоотдачи, моль/(м²·с·моль/м³); q_m – тепловой эффект реакции м, кДж/моль; α – коэффициент теплоотдачи, кВт/(м²·К); T_p – температура потока выбросов, К; T_k – температура выбросов на поверхности катализатора, К; s – удельная площадь поверхности катализатора, м²/м³.

Скорость каталитических реакций определялась с учетом влияния температуры процесса и лимитировалась кинетической скоростью самой

медленной реакции в цепи – реакции связывания оксида азота с поверхностной платиной [19, 27]:

$$k = 2,1 \cdot 10^{12} \cdot T_k \cdot e^{\left(\frac{-80,7}{R \cdot T_k}\right)} \quad (12)$$

где T_k – температура выбросов на поверхности катализатора, К; R – газовая постоянная.

Расчеты производились при условии полностью открытых шиберов на соплах вторичного дутья. При положении воздушных регистров горелок (верх/низ, %) гор. №1 – 60/80, гор. №2 – 80/80, гор. №3 – 60/80 и с учетом включения в работу «правого» дутьевого

вентилятора на нагрузке свыше 90 т/ч. Расход газа при варьировании нагрузки котла определялся при давлении газа 22 кПа, низшей теплоте сгорания топлива 8272 ккал/м³ и плотности 0,753 кг/м³.

Эффективность очистки оценивалась методом регрессионного анализа по результатам расчета алгоритма расчета толщины слоя катализатора (рис. 3), полученного на основе математической модели (11), показавшей хорошую сходимость с экспериментальными данными и результатами других исследователей [13, 19].

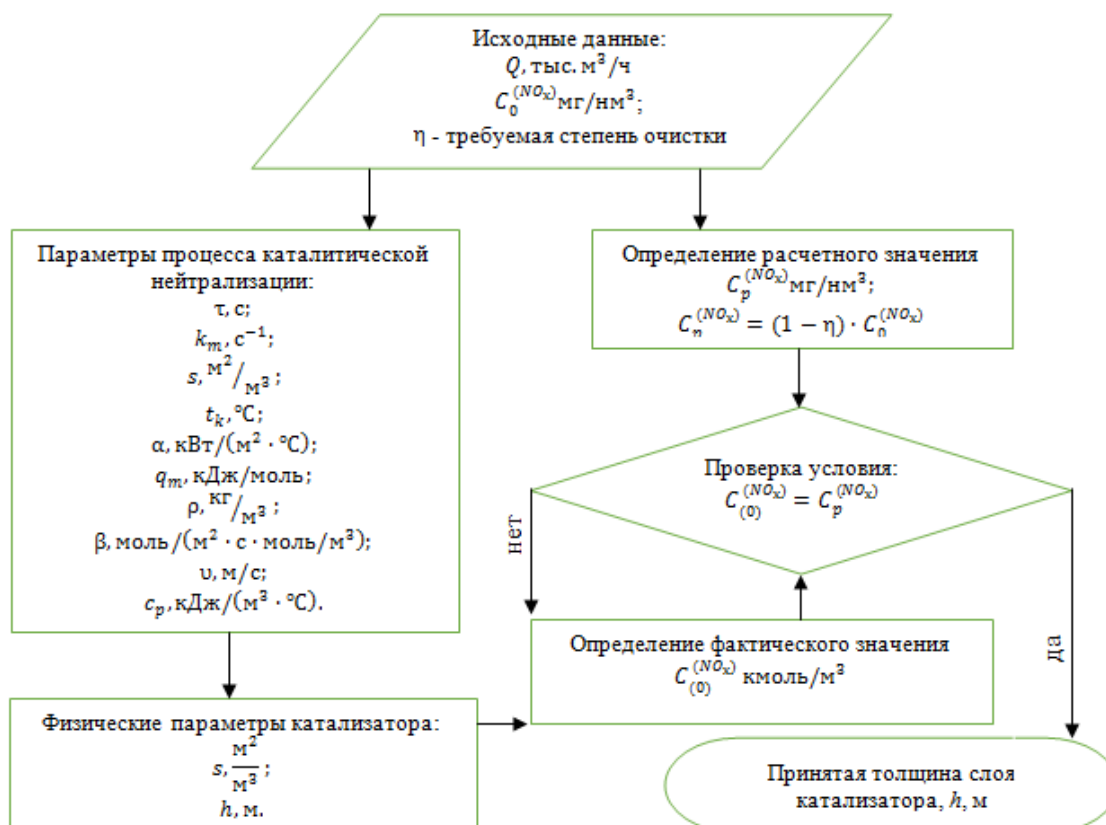


Рисунок 3 – Алгоритм расчета толщины слоя катализатора

Результаты. Выполнен расчет эффективности снижения выбросов окислов азота за счет работы нейтрализатора токсичных компонентов дымовых газов за пароперегревателем энергетического котла НЗЛ-110 Самарской ГРЭС, при этом учитывалось, что коэффициент избыточного воздуха составляет 1,4.

Результаты расчетов приведены в таблице 1.

На рисунках 4-5 представлены графические зависимости степени эффективности очистки, при условии равномерного распределения дымовых газов по слою катализатора, от параметров работы оборудования.

Таблица 1 – Показатели работы котла НЗЛ-110 К.А.№3 Самарской ГРЭС при использовании метода вторичного дутья и каталитического метода очистки дымовых газов в зависимости от паропроизводительности

№ п/п	Наименование	Обозн.	Размер.	Нагрузка котла, т/ч			
				62	78	91	110
1	Содержание окислителя в дымовых газах в зоне установки нейтрализатора	O ₂	%	5,05	4,14	5	4,1
2	Скорость дымовых газов в зоне установки нейтрализатора	v (после ПП)	м/с	5,06	5,58	5,79	6,78
3	Температура дымовых газов	t _г ^{РВП}	°C	450	466	467	476
4	Концентрация оксида углерода (α=1,4)	CO	мг/м³	не более 28			
5	Концентрация окислов азота (α=1,4) при применении схемы вторичного дутья	NO _x	мг/м³	125,1	273,8	277,5	278,7
6	Концентрация окислов азота (α=1,4) после нейтрализатора	NO _x	мг/м³	4,52	13,4	15,15	23,24

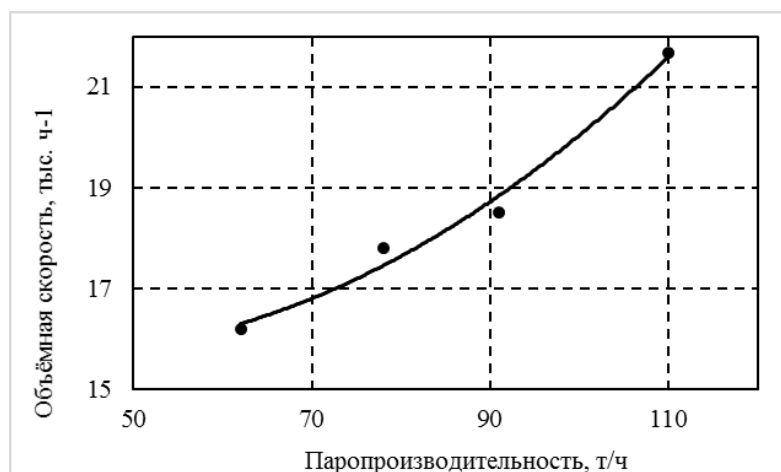


Рисунок 4 – Зависимость объемной скорости дымовых газов в сечении блока катализатора от нагрузки котлоагрегата

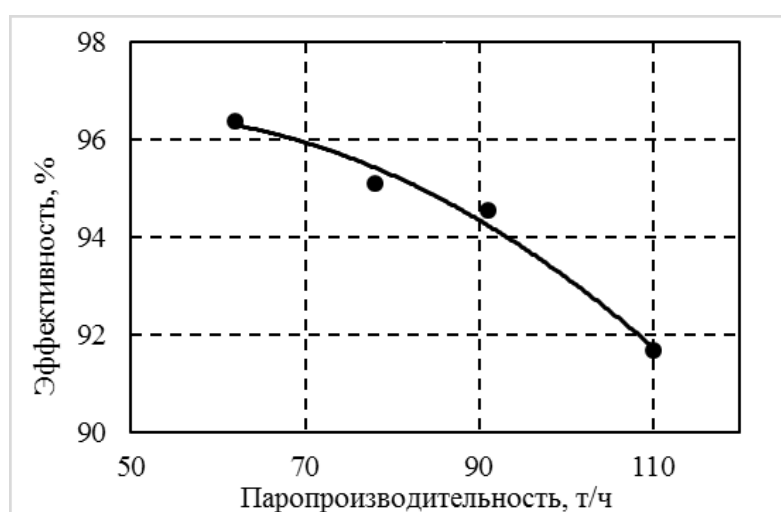


Рисунок 5 – Зависимость эффективности очистки в блоке катализаторе от паропроизводительности котлоагрегата

Соответствие получаемой степени очистки дымовых газов от окислов азота после каталитического слоя нормативам выбросов в атмосферу [27] определялось из условия:

$$\eta = 1 - \frac{C_p^{NO}}{C_0^{NO}}, \% \quad (13)$$

где C_p^{NO} – текущая концентрация окислов азота по длине слоя катализатора, кмоль/м³; C_0^{NO} – допустимая концентрация удельных массовых выбросов окислов азота, кмоль/м³ [27].

Обсуждение. Проведенные исследования позволили выявить высокую вариативность применения нейтрализатора токсичных компонентов дымовых газов без введения внешнего реагента как для водогрейных котлов, так и для парогенераторов, производительность которых превышает 50 т/ч. Анализ полученных расчетных данных выявил снижение концентрации окислов азота до 94% в пределах нагрузки котла до $0,85D_{max}$, т/ч. При максимальной производительности степень эффективности составила более 91,5%, что коррелируется с результатами ранее проведенных исследований [13,19].

Предложенная конструкция нейтрализатора

токсичных компонентов дымовых газов без введения внешнего реагента [9] показала значительную эффективность в широком диапазоне регулирования нагрузки и высокую степень универсальности для различных категорий промышленных котельных агрегатов.

Следует иметь в виду, что регулирование избыточного воздуха существенно влияет на генерацию как окислов азота, так и оксида углерода. Корреляционные зависимости влияния избытка окислителя на значения фактических концентраций загрязнителей в выбросах котла НЗЛ-110 Самарской ГРЭС представлены на рисунках 6-7.

Графические зависимости (рис. 6-7) получены на основании данных режимных карт и балансовых испытаний [13] котла НЗЛ-110 К.А.№3 Самарской ГРЭС. Анализируя динамику изменения концентраций NO_x и CO можно сделать следующие заключения: генерация оксида углерода снижается при увеличении доли окислителя в зоне первичного сжигания, а максимальные концентрации окислов азота наблюдаются в интервале значений коэффициента избытка воздуха от 1,2 до 1,3. Соответственно, на показатели экологической эф-

эффективности рассматриваемого нейтрализатора будут оказывать влияние не только конструктивные технологические параметры работы котельного агрегата, но и доля избыточного воздуха в процессе сжигания топлива [28].

Таким образом, для достижения максимального эффекта каталитической нейтрализации необходимо

оптимизировать параметры топочного процесса. Основной задачей данной оптимизации должно являться обеспечение такого уровня избытка окислителя, при котором концентрации оксида углерода, выработанного в процессе сжигания газа, будет достаточно для полного восстановления окислов азота.

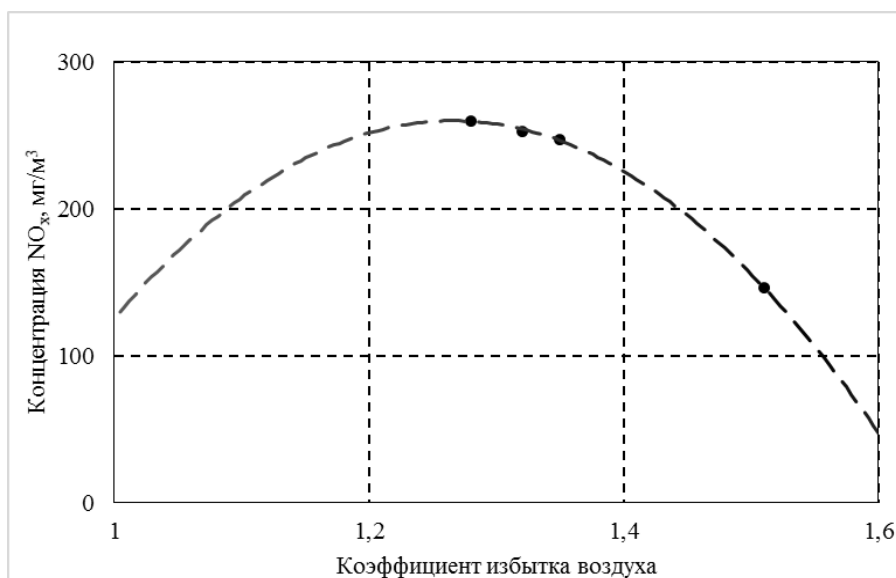


Рисунок 6 – Зависимость концентрации NO_x в выбросах котла НЗЛ-110 от коэффициента избытка воздуха при использовании схемы вторичного дутья

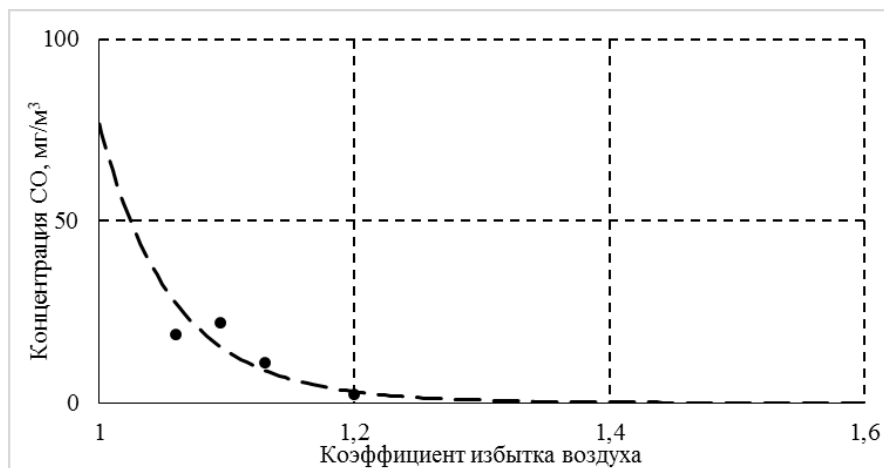


Рисунок 7 – Зависимость концентрации CO в выбросах котла НЗЛ-110 от коэффициента избытка воздуха при использовании схемы вторичного дутья

Выводы. Предложено для снижения содержания окислов азота в воздушной среде осуществлять очистку атмосферных выбросов теплоснабжающих предприятий с помощью нейтрализатора токсичных компонентов дымовых газов без введения внешнего реагента;

Выполнен расчет эффективности снижения выбросов окислов азота при использовании нейтрализатора токсичных компонентов дымовых газов без введения внешнего реагента для эксплуатационных параметров работы энергетического котла НЗЛ-110 Самарской ГРЭС, паропроизводительностью 50 т/ч и

выше;

Установлена высокая степень эффективности нейтрализатора токсичных компонентов дымовых газов без введения внешнего реагента, о чем свидетельствует снижение концентрации окислов азота до 94% в пределах нагрузки котла до $0,85D_{max}$ т/ч, а также возможность его применения как для водогрейных котлов, так и для парогенераторов, производительность которых превышает 50 т/ч;

Определена высокая степень влияния режимных параметров топочного процесса на эффективность комплексной очистки выбросов от окислов азота и

оксида углерода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2020 году» // Минприроды России; МГУ им. М.В. Ломоносова. – Москва. – 2023. – 686 с.
2. Габдулина В.В., Филиппова Т.М. Основные загрязняющие выбросы теплоэнергетики на примере ТЭЦ // Вестник Ангарского государственного технического университета. – 2020. – № 14. – С. 157-161.
3. Hanatani A., Ozawa M. General planning of thermal power plant // *Advances in Power Boilers*. – Elsevier. – 2021. – P. 107-118.
4. Storm, K. Solar thermal power plant // *Industrial Process Plant Construction Estimating and ManHour Analysis*. – Cambridge, USA. – 2019. – P. 187-215.
5. Yu S.H., Gang S.G., Seok J.I., Yu J.S., Choe Y.J., Go Y.G., Kim H.J. Development Trend of High Efficiency and Low Emissions Thermal Power Plants // *KEPCO journal on Electric Power and Energy*. – 2016. – Vol. 2. – P. 193-203.
6. Мочалов О.В. Уменьшение выбросов NOx путем ступенчатого сжигания топлива // *Международный научно-исследовательский журнал*. – 2023. – № 12 (138). – С. 1-7.
7. Султанов Е.В., Булушев Д.А., Акинин Н.И., Смирнов С.П. Количественное определение оксидов азота (II) в продуктах взрыва модельных промышленных составов на основе нитрата аммония // *Успехи в химии и химической технологии*. – 2022. – Т. 36. – № 10 (259). – С. 124-128.
8. Сасенко Н.А., Петров Э.М., Баранецкий В.В. Проблемы экологической безопасности // *Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования*. – 2021. – № 1(8). – С. 337-340.
9. Пат. Российская Федерация. Устройство для очистки дымовых газов [Текст] / Баландина О.А. [и др.]. № 215634 от 29.07.2022, опубл. 21.12.2022.
10. Lin D., Zhang L., Liu Z., Wang B., Han Y. Progress of selective catalytic reduction denitrification catalysts at wide temperature in carbon neutralization // *Frontiers in Chemistry*. – 2022. – Vol. 10. – P. 946133.
11. Gao F., Zeng Y., Zhang S., Zhong Z. Oxalic acid-mediated regeneration strategy and mechanism of phosphorus poisoned CeO₂/TiO₂ catalysts for selective catalytic reduction of NOx with NH₃ // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2024. – Vol. 12. – No. 1. – P. 111792.
12. Пат. Российская Федерация. Сокращение выбросов оксида азота (NOx) в печи с кислородно-топливным сжиганием [Текст] / Ингдолл Джеффри (US), МакКЕЙМИ Джеймс, У (US). № 2779201 от 24.10.2018, опубл. 05.09.2022.
13. Пат. Российская Федерация. Система и способ управления выделениями NOx из котлов, сжигающих углеродные топлива, без использования внешнего реагента [Текст] / Фань Чжень (US), У Сун (US). № 2299758 от 16.12.2003, опубл. 27.05.2007.
14. Larki I., Zahedi A., Asadi M., Forootan M.M., Farajollahi M., Ahmadi R., Ahmadi A. Mitigation approaches and techniques for combustion power plants flue gas emissions: A comprehensive review // *Science of The Total Environment*. – 2023. – P. 166108.
15. Караханов Э.А., Максимов А.Л. Двухфазный катализ в нефтехимических процессах // *Рос. хим. журнал*. – 2008. – Т. 52. – № 4. – С. 125-135.
16. Лисова Н.С., Митричев И.И., Кольцова Э.М. Определение кинетических параметров реакции CO+NO // *Успехи в химии и химической технологии: сб. науч. тр.* – М.: ПХТУ им. Д. И. Менделеева, 2015. – Т. 29. – № 4. – С. 60-62.
17. Mitrichev I.I., Zhensa A.V., Kol'tsova E.M. Thermodynamic criteria for estimating the kinetic parameters of catalytic reactions // *Russian Journal of Physical Chemistry A*. – 2017. – Vol. 91. – No. 1. – P. 44-51.
18. Баландина О.А., Филатова Е.Б., Пуринг С.М. К вопросу о методах определения кинетических параметров окислительных реакций на поверхности Pt катализатора // *Международный научно-исследовательский журнал*. – 2020. – № 7-1 (97). – С. 39-44.
19. Balandina O.A., Puring S.M., Vatzov D.N., Filatova E.B. On the question of increasing the purification efficiency of flue gases from the boiler unit of HEPS Volzhsky automobile plant // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – IOP Publishing. – 2021. – Vol. 1083. – No. 1. – P. 012078.
20. Баландина О.А. Определение конструктивных особенностей устройства нейтрализации токсичных компонентов дымовых газов // *Городское строительство и архитектура*. – 2023. – Т. 13. – № 4. – С. 64-68.
21. Зиганшина С.К., Кудинов А.А. Предварительный подогрев дутьевого воздуха энергетического котла продуктами сгорания природного газа // *Промышленная энергетика*. – 2022. – № 10. – С. 31-38.
22. Зиганшина С.К., Кудинов А.А. Повышение эффективности котла НЗЛ-110 за счет подогрева дутьевого воздуха продуктами сгорания в конденсационном теплообменнике // *Проблемы Совершенствования топливно-энергетического комплекса*. – 2022. – С. 124-130.
23. Отчет по результатам проведенных испытаний на котле типа НЗЛ-110 ст. 3 Сам ГРЭС филиала Самарский ПАО «Т Плюс» после капитального ремонта 2017 год [Текст]: исполн. Гаврилов В.К. [и др.] – 2020.
24. Баландина О.А., Ватузов Д.Н., Филатова Е.Б. Определение экологических показателей работы котельного агрегата в составе ГРЭС // *Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство и строительные технологии*. – 2021. – С. 691-697.
25. СТО 70238424.13.020.30.002-2010. Методика расчета и установления максимальных допустимых удельных выбросов для действующих котельных установок тепловых электростанций [Текст] (Сведения внесены распоряжением Минприроды России от 28.06.2021 № 22-р (с изменениями, внесенными распоряжением Минприроды России от 26.12.2022 № 38-р) / Некоммерческое партнерство "Инновации в электроэнергетике". Москва, 2010. 20 с.
26. Prasad V.S., Aghalayam P. Microkinetic modelling of NO reduction on Pt catalysts // *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering*. – 2016. – Vol. 10. – No. 11. – P. 1398-1404.
27. СТО ОАО «Мосэнерго». Методика определения валовых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от ТЭС и котельных. – Москва. – 2013. (Сведения внесены распоряжением Минприроды России от 28.06.2021 № 22-р).
28. Qiao Y., Li S., Jing X., Chen Z., Fan S., Li Z. Combustion and NOx formation characteristics from a 330 MWe retrofitted anthracite-fired utility boiler with swirl burner under deeply-staged-combustion // *Energy*. – 2022. – Vol. 258. – P. 124832.

Статья поступила в редакцию 12.02.2024

Статья принята к публикации 15.03.2024

УДК 622.276.55;613.64

EDN: SVJMRC

АНАЛИЗ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО РИСКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ШУМА И ВИБРАЦИИ НА РАБОТНИКОВ НЕФТЯНЫХ ШАХТ

© Автор(ы) 2024

SPIN: 5889-7498

AuthorID: 1216440

ORCID: 0000-0002-3144-980X

ResearcherID: ADD-4078-2022

ScopusID: 57222538745

МЯКОВ Владислав Владимирович, аспирант

Санкт-Петербургский горный университет

(199106, Россия, Санкт-Петербург, линия 21-я В.О., дом 2, e-mail: s215061@stud.spmi.ru)

SPIN: 5251-6351

AuthorID: 352624

ORCID: 0000-0003-2074-9695

ResearcherID: AAI-1662-2019

ScopusID: 57196279711

КОРШУНОВ Геннадий Иванович, доктор технических наук,

профессор кафедры «Безопасности производств»

Санкт-Петербургский горный университет

(199106, Россия, Санкт-Петербург, линия 21-я В.О., дом 2, e-mail: korshunov_gi@pers.spmi.ru)

Аннотация. В статье содержатся результаты анализа профессиональной заболеваемости среди горнорабочих нефтяных шахт России, вызванной влиянием шума и вибрации на рабочих местах, сформированные на основе алгоритма оценки риска с использованием статистических данных. Рассмотрены результаты медицинских осмотров, измерения показателей вредных производственных факторов, оказывающих негативное воздействие на горнорабочих. Приводятся полученные путем регрессионного анализа зависимости между уровнями шума и вибрации на рабочих местах, а также вероятностью возникновения профессиональных заболеваний виброакустической этиологии. На основе полученных закономерностей авторами использован алгоритм оценки риска возникновения профессиональных заболеваний, учитывающий синергетический эффект при совместном воздействии шума и вибрации. В заключении приводятся результаты применения предложенных математических закономерностей, выводы о критических уровнях воздействия вредных производственных факторов, последствиях потенциального воздействия факторов на организм человека, а также рекомендации по повышению безопасности труда горнорабочих нефтяных шахт.

Ключевые слова: охрана труда, нефтяная шахта, производственный шум, общая и локальная вибрация, синергетический эффект, оценка профессионального риска.

ANALYSIS OF OCCUPATIONAL RISK OF NOISE AND VIBRATION EXPOSURE FOR OIL MINE WORKERS

© The Author(s) 2024

МЯКОВ Vladislav Vladimirovich, post-graduate student

Saint Petersburg Mining University

(199106, Russia, St Petersburg, 21st line, 2, e-mail: s215061@stud.spmi.ru)

КОРШУНОВ Gennadiy Ivanovich, doctor of technical sciences,

professor of the Department of «Production Safety»

Saint Petersburg Mining University

(199106, Russia, St Petersburg, 21st line, 2, e-mail: e-mail: korshunov_gi@pers.spmi.ru)

Abstract. The article contains the results of the analysis of occupational morbidity among miners of oil mines in Russia, caused by the influence of noise and vibration at workplaces, formed on the basis of the algorithm of risk assessment using statistical data. The results of medical examinations, measurements of indicators of harmful production factors that have a negative impact on miners are considered. Dependences between noise and vibration levels at workplaces, as well as the probability of occupational diseases of vibroacoustic etiology obtained by regression analysis are presented. Based on the obtained regularities, the authors used an algorithm for assessing the risk of occupational diseases, considering the synergetic effect of joint exposure to noise and vibration. The conclusion contains the results of application of the proposed mathematical regularities, conclusions about critical levels of exposure to harmful production factors, consequences of the potential impact of factors on the human body, as well as recommendations for improving occupational safety of oil miners.

Keywords: occupational safety, oil mine, industrial noise, general and local vibration, synergetic effect, occupational risk assessment.

Для цитирования: Мяков В.В. Анализ профессионального риска воздействия шума и вибрации на работников нефтяных шахт / В.В. Мяков, Г.И. Коршунов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 1(65). – С. 164-169. – EDN: SVJMRC.

Введение. Риск-ориентированный подход в современных системах управления охраной труда и промышленной безопасностью показывает свою эффективность, позволяя заранее обнаружить опасности для персонала, риски возникновения аварии и превентивно снижать вероятность приобретения заболевания либо формирования аварии. К наиболее репрезентативным методам оценки рисков относят статистический анализ, так как он позволяет выявить закономерности на основе ретроспективных данных с максимально объективными результатами и минимальным количеством допущений [1]. Ключевыми вредными производственными факторами (ВПФ), обладающими наибольшей интенсивностью воздействия на персонал нефтяных шахт, наряду с неблагоприятным микроклиматом и повышенными уровнями запыленности, являются виброакустические факторы. Оценка профессионального риска в результате воздействия нагревающегося микроклимата на персонал нефтяных шахт уже была рассмотрена в работе [2]. Согласно статистическим данным медицинских осмотров виброакустические факторы, воздействуя на персонал действующих в России нефтяных шахт, в 59% случаев приводят к возникновению профессиональных заболеваний. [3] Вместе с тем, совместное воздействие ВПФ приводит к возникновению синергетических эффектов и взаимному усилению их негативного воздействия на организм работников [4].

В исследовании [3] показано, что к группе риска по возникновению заболеваний органов слуха относится персонал нефтешахт, занятый на участке проходки и добычи нефти. Здесь средний стаж работы, при котором отмечается начальная степень нарушения слуха, равен 5,5 годам, умеренная степень нарушения слуха наблюдается при среднем стаже 8,9 лет, легкая степень – при стаже 12,4 года, выраженная – при стаже 19,4 лет. Для проходчика, крепильщика, машиниста горных выемочных машин и машиниста буровой установки усугубляющим фактором является локальная вибрация. Средний стаж возникновения вибрационной болезни у подземного персонала – 8,4 года, а при стаже 5 лет изменения вибрационной чувствительности отмечают у более чем 87% работников. Стоит отметить, что у подземного персонала, который занят на работах в специфических производственных условиях нефтешахт (повышенные физические нагрузки, нагревающий микроклимат, наличие компонентов нефти в рудничном воздухе) сенсорная полинейропатия верхних конечностей может сопровождаться вегетативно-трофическими расстройствами и поражением костно-мышечной системы [3].

Основными причинами возникновения у горнорабочих профессиональных заболеваний ви-

броакустической этиологии является образование недопустимых уровней производственного шума и вибрации на рабочих местах, недостаточная эффективность защитных мероприятий технического характера, отсутствие либо формальное отношение к обучению работников вопросам охраны труда, а также пренебрежение или неправильное использование работниками средств индивидуальной защиты (СИЗ) [5, 6]. В подобных условиях для повышения безопасности труда горнорабочих целесообразно более активное применение мероприятий организационного характера, базирующихся на принципах риск-ориентированного подхода. Для этого может быть предложен алгоритм оценки профессионального риска возникновения профессиональных заболеваний работников по причине совместного воздействия виброакустических факторов, основанный на общепринятых методиках оценки рисков и формализованных зависимостях между уровнями шума и вибрации на рабочих местах, а также вероятностью развития соответствующих профессиональных заболеваний.

Методология. При проведении анализа и формирования алгоритма оценки риска за основу была выбрана методика оценки статистических данных, представленная в [7]. На основе статистических данных [3, 8] о результатах профессиональных медицинских осмотров, измерений показателей ВПФ на рабочих местах нефтешахт и принятой методики количественной оценки рисков произведен регрессионный анализ взаимосвязи между переменными – уровнями шума и вибрации, а также вероятностями развития тугоухости и вибрационной патологии при стаже 20 лет соответственно. Исходные данные приведены в таблице 1.

Результаты регрессионного анализа, отражающие влияние ВПФ на риск развития профзаболеваний, представлены на рисунке 1 и рисунке 2. Из линии тренда, представленной на рисунке 1, следует вывод о том, что уровень шума выше 80 дБА является критическим, так как после данного значения резко возрастает вероятность развития тугоухости. Полученные данные пригодны для проведения оценки профессионального риска развития тугоухости с применением балльного метода, представленного в [9]. С этой целью были выделены категории риска по показателю интенсивности шумового воздействия (табл. 2). При этом каждой категории риска присвоен балл по шкале от 1 (низкий риск) до 5 (высокий риск).

При анализе зависимости на рисунке 2 определено критическое значение вибрации на уровне 120 дБ. Аналогичным образом были определены категории риска по показателю интенсивности вибрационного воздействия, указанные в таблице 3.

Таблица 1 – Вероятность развития профессиональных заболеваний у подземного персонала нефтешахт

Профессия	Уровень шума, дБА	Вероятность развития тугоухости, доли ед.	Уровень вибрации, дБ	Вероятность развития вибрационной патологии, доли ед.
Проходчик	95,4	0,300	131,5	0,731
Машинист горных выемочных машин	91,3	0,096	129,3	0,306
Крепильщик	97	0,100	131,5	0,623
Машинист буровой установки	93,2	0,092	121,1	0,591
Оператор по добыче нефти и газа	91	0,078	103,4	0,130
Дорожно-путевой рабочий	72,8	0,001	0,0	-

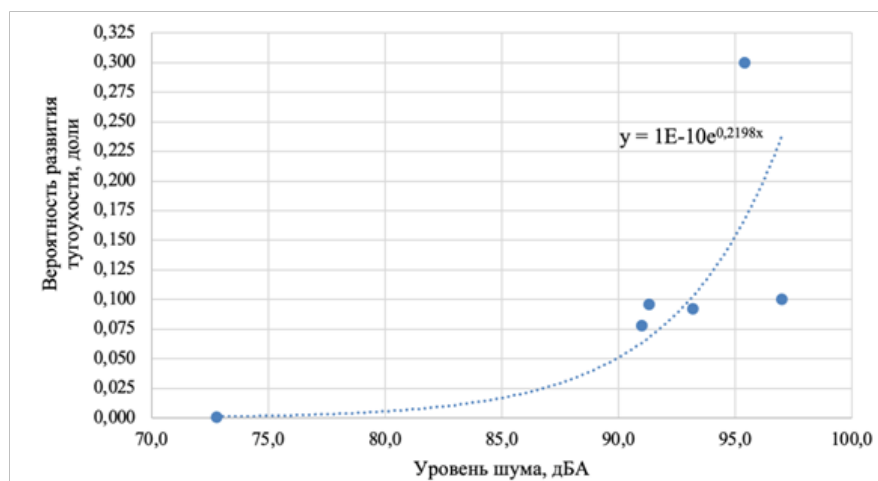


Рисунок 1 – Вероятность развития тугоухости после 20-летнего стажа работы в зависимости от уровня шума на рабочих местах (составлено авторами)

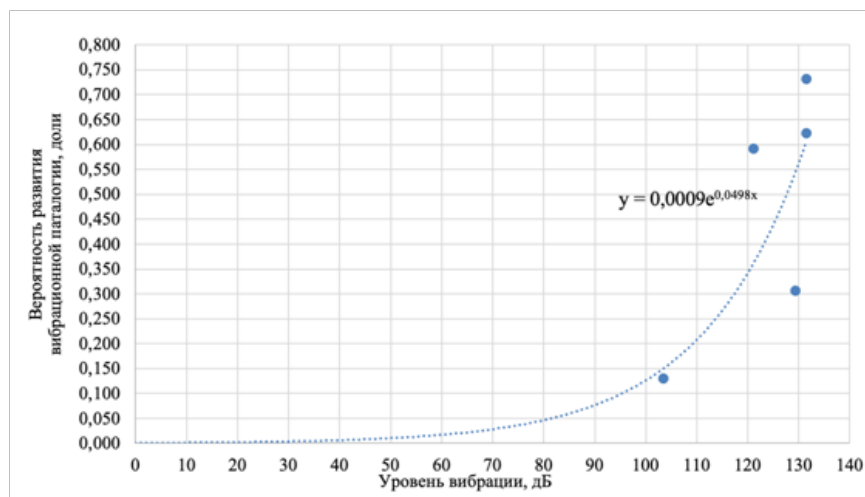


Рисунок 2 – Вероятность развития вибрационной патологии после 20-летнего стажа работы в зависимости от уровня вибрации (составлено авторами)

Таблица 2 – Граничные значения категорий риска по уровню шума

Категория риска (балл)	Вероятность развития тугоухости	Уровень шума, дБА	Класс условий труда по фактору вибрации [10]
1	J	< 80	2
2	0,0041 - 0,010	80-85	3.1
3	0,011 - 0,120	86-95	3.2
4	0,121 - 1,05	96-105	3.3
5	> 1,05	>105	3.4

Таблица 3 – Граничные значения категорий риска по уровню вибрации

Категория риска (балл)	Вероятность развития вибрационной патологии	Уровень вибрации, дБ	Класс условий труда по фактору шума [10]
1	I	< 126	2
2	0,481 - 0,550	126-129	3.1
3	0,551 - 0,640	130-132	3.2
4	0,641 - 0,750	133-135	3.3
5	> 0,750	>135	3.4

Результаты категорирования риска развития профессиональных заболеваний представлены на рисунке 3.

Результаты. Представленные на рисунках 1 и 2 математические закономерности на основе методики оценки статистических данных, а так же выводы по ним из таблиц 2 и 3, позволяют выполнять оценку развития у работников нейросенсорной тугоухости и вибрационной болезни в зависимости от уровней шума и вибрации на рабочих местах. Учитывая наличие синергетического эффекта при одновременном воздействии производственного шума и вибрации на работников, для оценки профессионального риска их совместного воздействия предлагается мат-

ричный метод, использующий в качестве исходных данных уровни шума и вибрации на рабочих местах (табл. 4). При адаптации типовой матрицы были приняты во внимание результаты исследования [11], указывающие на то, что фактор шума играет существенную роль не только в изменении слуховой, но и вибрационной чувствительности при сочтанным воздействии двух факторов (вклад шума в изменение порога вибрационной чувствительности отмечен на уровне 23 %).

Предложенный метод использован для оценки профессиональных рисков развития тугоухости и вибрационной патологии для ряда профессий на нефтяных шахтах России (табл. 5).

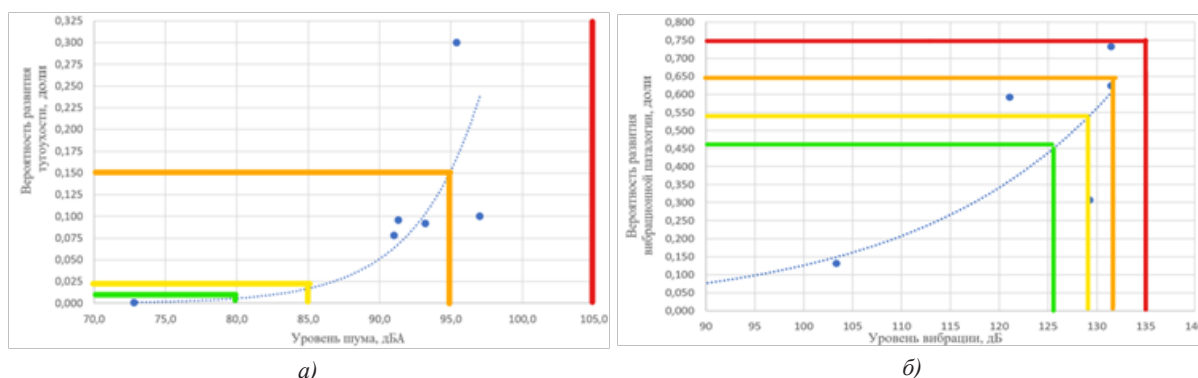


Рисунок 3 – Категории профессионального риска воздействия шума (а) и вибрации (б) (составлено авторами)

Таблица 4 – Матрица оценки риска развития профессиональных заболеваний виброакустической этиологии при совместном воздействии шума и вибрации

Категория риска по уровню вибрации, балл	Категория риска по уровню шума, балл				
	1	2	3	4	5
1	Н	П	К	В	ОВ
2	П	К	В	ОВ	ОВ
3	К	В	ОВ	ОВ	ОВ
4	В	ОВ	ОВ	ОВ	ОВ
5	ОВ	ОВ	ОВ	ОВ	ОВ

Н – низкий риск, П – повышенный риск, К – критический риск, В – высокий риск, ОВ – очень высокий риск

Таблица 5 – Результаты оценки риска развития профессиональных заболеваний

Профессия	Категория риска по уровню шума	Категория риска по уровню вибрации	Категория риска по развитию заболеваний виброакустической этиологии
Проходчик	4	4	ОВ
Крепильщик	4	3	ОВ
Машинист горных выемочных машин	3	3	ОВ
Машинист буровой установки	3	3	ОВ

Обсуждение. Полученные данные свидетельствуют о том, что при снижении профессиональных рисков в первую очередь следует уделять внимание профессии проходчика, поскольку их рабочим местам свойственны наиболее высокие значения риска развития как тугоухости, так и вибрационных патологий. В группу риска по развитию заболеваний виброакустической этиологии, вызванных совместным воздействием более низких по сравнению с профессией проходчика уровней шума и вибрации, стоит относить профессии крепильщика, машиниста горных выемочных машин, машиниста буровой установки.

На указанных рабочих местах необходимо в срочном порядке обеспечить требуемые меры безопасности, выполнить модернизацию используемого оборудования, усилить контроль за использованием работниками СИЗ. Для обеспечения возможности заблаговременного реагирования на возникающие профессиональные риски, на всех рабочих местах требуется выполнять систематический контроль за уровнями вибрации и шума, а также рассмотреть возможность проведения допуска персонала к работам с учетом уровня воздействия ВПФ, возраста и продолжительности работы в данной должности [12].

В смежных отраслях горного дела различные авторы так же приходят к выводу о необходимости повышения контроля применения СИЗ либо их модернизации. Так, в статье [13] авторы приходят к выводу о значительной доле пренебрежения ношению СИЗ среди сотрудников добычи песка и гравия на примере предприятий в Индонезии. В статье [14] авторы на основе анализа статистических данных о несчастных случаях в Российской Федерации и расследований сделали вывод о недостаточном контроле ношения СИЗ. Так же в данной статье одной из предлагаемых мер по улучшению контроля ношения СИЗ предлагают их модернизацию с внедрением инженерных решений, позволяющих дистанционно контролировать ношение различных средств защиты и их износ. Одна из предлагаемых концепций применения технологии промышленного интернета вещей с целью повышения менеджмента ношения средств защиты в горной промышленности представлена в статье [15].

Выводы. Более половины всех случаев возникновения профессиональных заболеваний среди горнорабочих нефтяных шахт возникают по причине повышенных уровней шума и вибрации на рабочих местах. Вместе с тем отмечается наличие синергетического эффекта как при совместном воздействии шума и вибрации, так и при комбинировании виброакустических факторов с другими ВПФ – нагревающим микроклиматом, высокой тяжестью труда, химическим фактором. Результатом указанного потенцированного воздействия является весьма быстрое возникновение у горнорабочих профессиональных заболеваний виброакустической

этиологии: начальная степень нарушения слуха возникает в среднем через 5,5 лет, вибрационная болезнь в среднем через 8,4 года.

Результаты применения предложенного алгоритма оценки риска развития профессиональных заболеваний, основанного на общепринятой методике оценки рисков и выявленных зависимостях между уровнями шума и вибрации и вероятностями развития профпатологий, позволил определить профессии, относящиеся к группе риска по развитию заболеваний виброакустической этиологии. Так, при планировании мероприятий по охране труда необходимо в первую очередь обеспечить безопасные условия труда по фактору шума и вибрации на рабочих местах проходчиков. Вместе с тем учет синергетического эффекта при воздействии шума и вибрации свидетельствует о необходимости включения в группу риска профессий крепильщика, машиниста горных выемочных машин, машиниста буровой установки.

Предложенный способ оценки профессиональных рисков позволяет выявлять категории риска среди персонала по показателям уровней шума и вибрации на рабочих местах предприятий различных отраслей промышленности, а также учитывать синергетический эффект при совместном воздействии данных вредных производственных факторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Тюленева Т.А., Кабанов Е.И. Использование риск-ориентированного подхода в управлении профессиональными рисками взрыва метана и пыли на угледобывающем предприятии //Техника и технология горного дела. – 2021. – № 2. – С. 13-32.
2. Рудаков М.Л., Степанов И.С. (2017). Оценка профессионального риска при воздействии нагревающего микроклимата при ведении подземных горных работ. Записки Горного института, 225, 364. <https://doi.org/10.18454/zpmi.2017.3.364>.
3. Грунско́й Т.В., Бердник А.Г., Бердник М.М. Гигиеническая оценка риска развития профзаболеваний у работников, занятых термошахтной добычей нефти // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2018. – Т.18, №1. – С.85-100. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.3.8.
4. Фомин А.И., Грунско́й Т.В. Организация ретроспективного исследования состояния здоровья работников нефтешахт Ярегского месторождения //Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах. – 2021. – С. 508 (1-5).
5. Глебова Е.В., Волохина А.Т., Вихров А.Е. (2023). Оценка эффективности управления культурой производственной безопасности в компаниях ТЭК. Записки Горного института, 259. С. 68-78. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.12>
6. Климова И.В. (2017). Инструктивные карты безопасных методов и приемов труда для отдельных видов работ, проводимых в нефтешахте. Записки Горного института, Т. 225. – С. 354-359. <https://doi.org/10.18454/zpmi.2017.3.354>.
7. ГОСТ Р 58771–2019 Национальный стандарт Российской Федерации «Менеджмент риска. Технологии оценки риска» // Официальный сайт «Электронный фонд правовых и нормативно технических документов». – <https://docs.cntd.ru/document/1200170253> (дата обращения 03.11.2023.).
8. Грунско́й Т.В., Комплексная оценка риска развития профессиональных заболеваний работников нефтяных шахт: дис. канд. тех. наук. – Кемерово, 2019. – 166 с.
9. "Об утверждении Рекомендаций по выбору методов

оценки уровней профессиональных рисков и по снижению уровней таких рисков": Приказ Минтруда России от 28.12.2021 N 926 // Официальный сайт компании «Консультант Плюс». – https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_406016/ (дата обращения 03.11.2023)

10. Об утверждении Инструкции о порядке составления, представления годовой, квартальной бухгалтерской отчетности государственных (муниципальных) бюджетных и автономных учреждений" (с изменениями и дополнениями): Приказ Минфина РФ от 25 марта 2011 г. N 33н // Официальный сайт компании «Консультант Плюс». – https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_112540/ (дата обращения 04.09.2023.)

11. Васильев А.В., Проблемы оценки сочетанного влияния шума и других физических факторов на здоровье человека // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. – №6-1.

12. Цхадая Н.Д. Совершенствование процедуры профессионального отбора персонала для работ с повышенной опасностью/ Н.Д.Цхадая, Д.Ю.Захаров // Записки Горного института. 2018. Т. 230. С. 204-208. [https://doi.org/10.25515/](https://doi.org/10.25515/pmi.2018.2.204)

13. Rr Dian Tristiana, Ratih Pravitasari, Erna Dwi Wahyuni. (2020). Contributing Factors of Personal Protection Equipment (PPE) Utilization among Sand and Gravel (SSG) Mine Workers. 10.37200/IJPR/V24I7/PR270893.

14. Nikulin, Andrei & Romanov, A.. (2017). Control over the use of personal protective equipment by employees, head protection. Ecology, Environment and Conservation. 23. – С. 384-389.

15. Adjiski, Vancho & Despodov, Zoran & Mirakovski, Dejan & Serafimovski, Dalibor. (2019). System architecture to bring smart personal protective equipment wearables and sensors to transform safety at work in the underground mining industry. Rudarsko-geološko-naftni Zbornik. 34. 37-44. 10.17794/rgn.2019.1.4.

Статья поступила в редакцию 17.12.2023

Статья принята к публикации 15.03.2024

УДК 614.841.2.001.2

EDN: TFYDHN

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТИПА ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ ЭЛЕКТРОВЕЛОСИПЕДА ПОСЛЕ ПОЖАРА

© Автор(ы) 2024

SPIN: 8987-0146

AuthorID: 984582

ORCID: 0000-0002-6630-4045

ScopusID: 57245729900

МОКРЯК Анна Васильевна, научный сотрудник отдела инновационных и информационных технологий в экспертизе пожаров Исследовательского центра экспертизы пожаров

*Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы МЧС России
(193079, г. Санкт-Петербург, Октябрьская набережная, д. 35, e-mail: mokryakanna@mail.ru)*

SPIN: 8914-6416

AuthorID: 851719

ORCID: 0000-0001-5479-8271

ПАРИЙСКАЯ Анна Юрьевна, научный сотрудник отдела инновационных и информационных технологий в экспертизе пожаров Исследовательского центра экспертизы пожаров

*Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы МЧС России
(193079, г. Санкт-Петербург, Октябрьская набережная, д. 35, e-mail: anna_par.74@mail.ru)*

Аннотация. Активные и немоторизованные виды транспорта приносят различные выгоды пользователям и обществу. Это включает в себя решение экологических проблем, связанных с моторизованными транспортными средствами, работающими на ископаемом топливе, уменьшение заторов на дорогах. Микромобильность с электроприводом, включая электрические велосипеды и электросамокаты, являются новыми видами мобильности. Однако распространение электрических велосипедов по всему миру привело к многочисленным несчастным случаям, связанным с зарядкой. Тепловой разгон является ключевой научной проблемой в исследованиях безопасности литий-ионных аккумуляторов. В данной статье представлен пример исследования фрагментов литий-ионных аккумуляторов после типичного пожара самодельного электровелосипеда. Исследование проводилось визуальным и рентгенофазовым анализами. По результатам рентгенофазового анализа проведена расшифровка полученных дифрактограмм. Определены фазы, присутствующие в остатках литий-ионных аккумуляторов, методом рентгенофазового анализа. Благодаря полученным результатам был установлен тип и вид представленных фрагментов литий-ионных аккумуляторов. Целью данной статьи является установление типа литий-ионных аккумуляторов методом визуального, морфологического и рентгенофазового анализов.

Ключевые слова: литий-ионная аккумулятор, экспертиза пожаров, электрический велосипед, тепловой разгон, рентгенофазовый анализ, фаза.

DETERMINING THE TYPE OF LITHIUM-ION BATTERIES AN ELECTRIC BIKE AFTER A FIRE

© The Author(s) 2024

MOKRYAK Anna Vasievna, researcher of the department of calculative methods and informational technologies in the fire expertise Fire Expertise Research Centre

*Saint-Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia
(193079, St. Petersburg, Oktyabrskaya emb., 35, e-mail: mokryakanna@mail.ru)*

PARIYSKAYA Anna Iurevna, researcher of the department of calculative methods and informational technologies in the fire expertise Fire Expertise Research Centre

*Saint-Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia
(193079, St. Petersburg, Oktyabrskaya emb., 35, e-mail: anna_par.74@mail.ru)*

Abstract. Active and non-motorized modes of transport bring various benefits to users and society. This includes solving environmental problems related to motorized vehicles powered by fossil fuels, reducing traffic congestion. Electric mobility, including electric bicycles and electric scooters, are new types of mobility. However, the proliferation of electric bicycles around the world has led to numerous charging-related accidents. Thermal overlocking is a key scientific issue in lithium-ion battery safety research. This article presents an example of a study of fragments of lithium-ion batteries after a typical fire of a homemade electric bicycle. The study was conducted by visual and X-ray phase analyses. Based on the results of X-ray phase analysis, the obtained diffractograms were decoded. The phases present in the remnants of lithium-ion batteries were determined by X-ray phase analysis. Due to the results obtained, the type and type of the presented fragments of lithium-ion batteries were determined. The purpose of this article is to establish the type of lithium-ion batteries by visual, morphological and X-ray phase analysis.

Keywords: lithium-ion battery, fire examination, electric bicycle, thermal acceleration, X-ray phase analysis, phase.

Для цитирования: Мокряк А.В. Определение типа литий-ионных аккумуляторных батарей электровелосипеда после пожара / А.В. Мокряк, А.Ю. Парийская // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 1(65). – С. 170-175. – EDN: TFDYDHM.

Введение. Рынок микромобильности с электроприводом быстро расширился по всему миру. Езда на электронных самокатах считается приятным занятием. Относительно небольшой размер и высокая скорость электросамокатов повышают их маневренность и облегчают навигацию в различных инфраструктурах, таких как тротуары и велосипедные дорожки. Независимо от преимуществ, эксплуатация электросамокатов на дорогах сопряжена с серьезными проблемами безопасности. За последние несколько лет наблюдается стремительное увеличение количества проводимых пожарно-технических экспертиз по пожарам электросамокатов. В большинстве случаев, основной причиной возникновения таких пожаров являются аварийные режимы работы электрооборудования [1-3]. Основным пожароопасным узлом является аккумуляторная батарея. Современные электросамо-

каты большей частью комплектуются литий-ионными аккумуляторами (ЛИА).

Но дороговизна электросамокатов вынуждает умельцев пересаживаться на более бюджетный вид транспортного средства – самодельный электровелосипед.

Электрические велосипеды постепенно развиваются в качестве дополнительного и важного транспортного средства для поездок на работу и на короткие расстояния. Основная проблема заключается в том, что широкая эксплуатация электронных велосипедов по всему миру привела к многочисленным проблемам с безопасностью зарядки.

Электрический велосипед – это тип электромотоцикла, созданный на основе традиционного велосипеда, к которому был добавлен электродвигатель для приведения его в движение.



Рисунок 1 – Устройство электрического велосипеда

В электровелосипедах в основном используются два типа аккумуляторных элементов: литий-железо-фосфатные и литий-ионные.

Литий-ионные батареи переживают бум благодаря своей высокой мощности энергии, портативности, быстрой зарядке и долговечности. Однако термическая стабильность ЛИА относительно низкая, и их выход из строя может привести к возгоранию и, при определенных обстоятельствах, взрыву. Риск возгорания препятствует широкомасштабному применению ЛИА в электромотоциклах.

Значительная опасность пожара или взрыва возникает при зарядке литий-ионных аккумуляторов и батарей. Причиной возникновения пожара могут стать как недостатки конструкции аккумулятора, так и качество зарядного устройства.

Когда ЛИА подвергаются воздействию условий, выходящих за рамки рекомендуемых требований эксплуатации, они могут выйти из строя из-за быстрого самонагрева, что приводит к тепловому разгону, и как следствие к воспламенению окру-

жающих материалов. Условия возникновения пожароопасных ситуаций можно разделить на три категории: термическое, электрическое и механическое воздействие.

Ранее авторами была проведена работа по исследованию остатков литий-ионных аккумуляторов после экспериментального моделирования теплового разгона. Объектами исследования являлись литий-ионные аккумуляторные батареи, типа «18650». Исследование проводилось визуально и методом рентгенофазового анализа. Данное исследование показало возможность определения типа литий-ионной батареи после теплового разгона, а также выявление признаков теплового разгона на их остатках.

Тепловой разгон является пожароопасным аварийным режимом работы литий-ионной батареи. Он может возникнуть в литий-ионных батареях практически любого химического состава [4-7].

Различают следующие основные факторы, приводящие к тепловому разгону:

- дефект конструкции батареи;
- дефект изготовления батареи (например, нарушение целостности пористого сепаратора из-за неточной нарезки электродов и попадания в пространство между анодом и катодом микрочастиц металла и т.п.);
- внешнее воздействие (термическое, механическое или электрическое);
- некачественная разработка или производство защитной электроники;
- некачественная разработка или производство зарядного устройства или системы.

Описанные выше факторы, вызывают явление теплового разгона, в результате которого возникает повышение давления, разгерметизация корпуса ЛИА и резкое высвобождение имеющейся энергии.

Основными признаками теплового разгона на корпусах литий-ионных аккумуляторных батарей являются:

- деформация корпуса: корпус может деформироваться или раздуваться из-за накопления газов внутри;
- изменение цвета или текстуры корпуса: корпус может изменять цвет или текстуру из-за повышенной температуры.

Основные признаки теплового разгона на медной и алюминиевой фольге литий-ионных аккумуляторных батарей:

- изменение цвета: фольга может менять цвет из-за повышенной температуры;
- разрушение или расщепление: фольга может

разрушаться или расщепляться из-за повышенного давления внутри батареи [8, 10-12].

В данной статье приведены результаты исследований фрагментов ЛИА после типичного пожара самодельного электровелосипеда.

Методология. Объектами исследования являлись фрагменты литий-ионных аккумуляторных батарей и их внутреннее содержимое.

Исследование фрагментов литий-ионных аккумуляторов проводилось визуально, методом рентгенофазового анализа.

Рентгенофазовый анализ позволяет идентифицировать фазы в кристаллических веществах. Данный метод является неразрушающим. Обнаружение фаз, входящих в состав литий-ионных аккумуляторных батарей, дает возможность определять тип аккумулятора. Исследование проводилось на рентгеновском дифрактометре РАДИАН ДР-01.

Рентгенофазовый анализ образцов проводился следующим образом. Вещество, отобранное из внутренней части корпуса аккумуляторов, растирали в яшмовой ступке, пропустив через сито. Полученный порошок помещали в кювету [13-14].

Расшифровка дифрактограмм осуществлялась использованием литературных данных [15-18].

Результаты. По сохранившимся батареям были измерены линейные размеры остатков ЛИА. Они составляют: диаметр 18 мм, длина 65 мм. Следовательно данные аккумуляторы принадлежат к виду литий-ионных аккумуляторных батарей 18650 (рис 2 а, б).



Рисунок 2 – Повреждения, обнаруженные на фрагментах литий-ионных аккумуляторных батарей

Наличие соединительных контактов свидетельствует о том, что аккумуляторы использовались в сборке батарей (рис 2с). Деформация корпуса с разрывами указывает на повреждения аккумулятора, вызванные тепловым разгоном. Такие повреждения могут привести к взрыву аккумулятора и утечке электролита (рис 2в, д). Локальный прожог корпуса может быть результатом высокой температуры или короткого замыкания внутри аккумулятора (рис 2б). Изменение цвета фольги говорит о воздействии на нее

повышенной температуры (рис. 2е).

Описанные повреждения являются признаками теплового разгона на корпусах литий-ионных аккумуляторных батарей.

Из отобранных с пожара фрагментов ЛИА (5 образцов), был проведен рентгенофазовый анализ внутренней части корпуса аккумулятора (рис. 3, 4). Расшифровка дифрактограмм осуществлялась с использованием литературных данных.

Результаты фазового состава приведены в таблице 1.

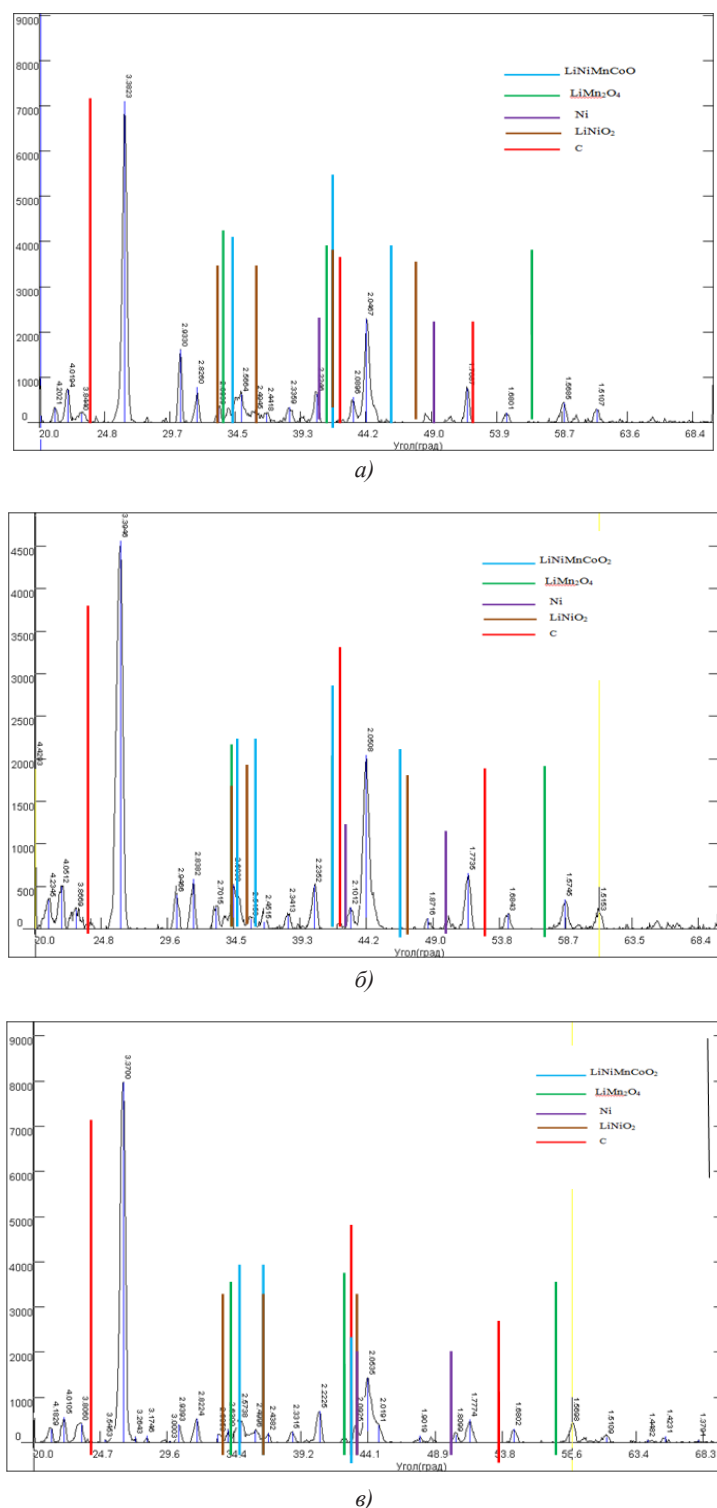


Рисунок 3 – Дифрактограммы внутреннего содержимого фрагментов исследуемых аккумуляторов: а, б, в – образцы 1-3

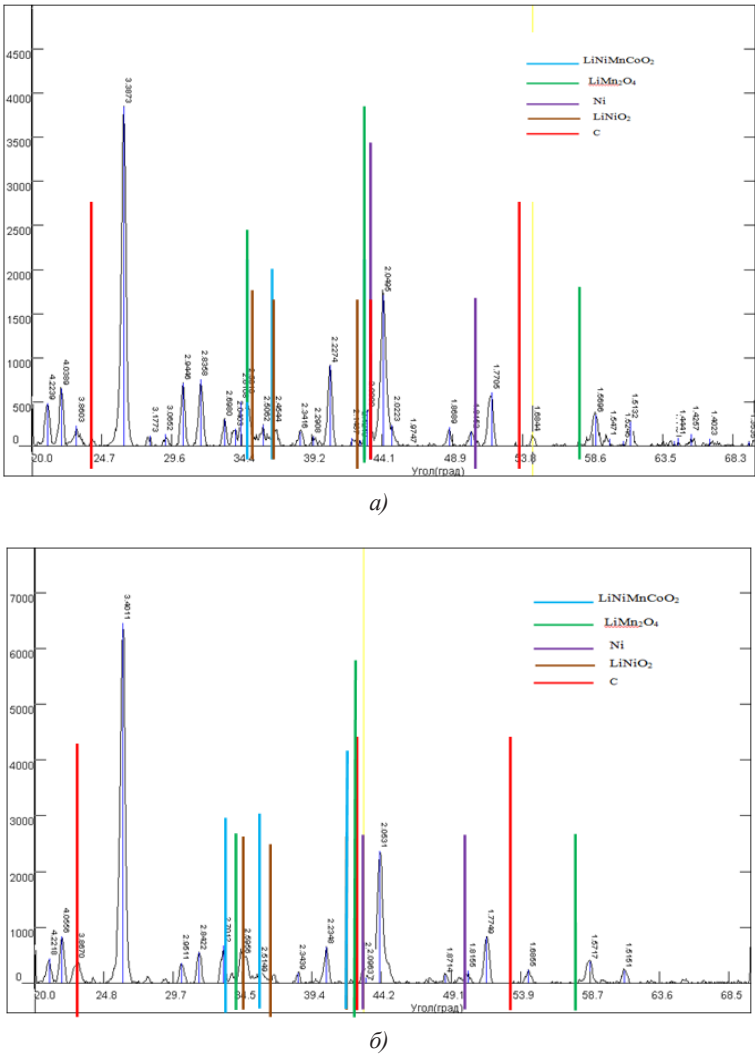


Рисунок 4 – Дифрактограммы внутреннего содержимого фрагментов исследуемых аккумуляторов: а, б – образцы 4-5

Таблица 1 – Кристаллографические данные основных фаз, присутствующих в исследуемом веществе

Угол, 2θ, град	Межплоскостное расстояние, d/n, Å	Интенсивность, Iабс	Предполагаемая фаза
C	3,38	100	Графит
	2,02	10	
	1,69	10	
Ni	2,03	100	Никель
	1,76	50	
LiNiO ₂	2,45	40	Литированный оксид никеля
	2,35	15	
	2,04	95	
	1,86	18	
LiMn ₂ O ₄	2,47	90	Литий марганцевый оксид
	2,05	100	
	1,58	50	
	1,45	90	
LiNiMnCoO ₂	2,446	37	Литий-никель-марганцевый-кобальтовый оксид
	2,344	11	
	2,037	95	
	1,87	11	

По результатам расшифровки дифрактограмм установлено наличие таких фаз, как графит, никель, литированный оксид никеля, литий марганцевый оксид, литий-никель-марганцевый-кобальтовый оксид.

Обсуждение. В результате проведенных исследований было установлено следующее:

Исследованные фрагменты аккумуляторных батарей принадлежат к виду литий-ионных аккумуляторных батарей 18650. Наличие соединительных контактов свидетельствует о том, что аккумуляторы использовались в сборке батарей. Повреждения, обнаруженные при исследовании фрагментов литий-

ионных аккумуляторов, являются признаками теплового разгона.

Анализ полученных дифрактограмм показал:

– все пять спектров идентичны друг другу, т.е. имеют один и тот же набор аналитических пиков. Данный факт говорит о том, что исследованные фрагменты аккумуляторных батарей (образцы № 1-5), вероятнее всего принадлежат одному и тому же типу;

– в исследуемых фрагментах обнаружены следующие фазы: графит, никель, литированный оксид никеля, литий марганцевый оксид, литий-никель-марганцевый-кобальтовый оксид. По фазам обнаруженным на остатках внутреннего содержания батарей, можно определить их тип. Фазы входящие в состав анода – графит, катода – литированный оксид никеля, литий марганцевый оксид, литий-никель-марганцевый-кобальтовый оксид. Данные химические вещества используют в материалах катодов и анодов литий ионных аккумуляторов.

Выводы. В результате участвовавших случаев переоборудования обычных велосипедов в электрические, при помощи установки батарей на раму велосипеда, увеличилось количество пожаров связанных с ними. Установление типа и вида ЛИА является криминалистически значимой информацией при установлении очага и причины пожаров.

Проведенные исследования визуальным и рентгенофазовым методами позволили определить тип ЛИА. Также проведя визуальное исследование представленных фрагментов литий-ионных аккумуляторов были обнаружены признаки теплового разгона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Плотноков В.Г., Чешко И.Д., Кондратьев С.А. Пожарная опасность литий-ионных аккумуляторов и низковольтных источников питания на их основе // Расследования пожаров. – 2014. – Вып. 4. – С. 53-58.
2. Q. Wang, B. Mao, S.I. Stolarov, J. Sun A review of lithium ion battery failure mechanisms and fire prevention strategies Prog. Energy. Combust. Sci., 73 (2019). – P. 95-131.
3. Скундин А.М., Ефимов О.Н., Ярмоленко О.В. Современное состояние и перспективы развития исследований литиевых аккумуляторов // Успехи химии. – 2012. – Т. 71. – № 4. – С. 378-398.
4. X. Tian, Y. Yi, B. Fang, P. Yang, T. Wang, P. Liu, L. Qu, M. Li, S. Zhang Design strategies of safe electrolytes for preventing thermal runaway in lithium ion batteries Chem. Mater., 32 (2020). – Pp. 9821-9848.
5. Y. Fu, S. Lu, K. Li, C. Liu, X. Cheng, H. Zhang An experimental study on burning behaviors of 18650 lithium ion batteries using a cone calorimeter J. Power Sources, 273 (2015). – Pp. 216-222.
6. Влияние эксплуатационных факторов на работу литий-ионного аккумулятора / М.А. Бураков [и др.]. // Символ науки. – 2019. – № 7.
7. Мельник А.А., Елисеев Ю.Н., Мокряк А.В. Основные факторы, провоцирующие пожарную опасность литий-ионных аккумуляторов / Техносферная безопасность. – 2021. – № 2 (31). – С. 113-116.
8. B. Mao, P. Huang, H. Chen, Q. Wang, J. Sun Self-heating reaction and thermal runaway criticality of the lithium ion battery Int. J. Heat Mass Transf., 149 (2020), Article 119178.
9. Chen, Mingyi & Ouyang, Dongxu & Cao, Shuchao & Liu, Jiahao & Wang, Zhi & Wang, Jian. (2018). Effects of heat treatment and SOC on fire behaviors of lithium-ion batteries pack. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 136. 10.1007/s10973-

018-7864-9.

10. W.C. Chen, J. De Li, C.M. Shu, Y.W. Wang Effects of thermal hazard on 18650 lithium-ion battery under different states of charge J. Therm. Anal. Calorim., 121 (2015). – P. 525-531.

11. C. Zhao, J. Sun, Q. Wang Thermal runaway hazards investigation on 18650 lithium-ion battery using extended volume accelerating rate calorimeter Journal of Energy Storage, 28 (2020), Article 101232.

12. Schmuck, R., Wagner, R., Hörpel, G. et al. Performance and cost of materials for lithium-based rechargeable automotive batteries. Nat Energy 3, 267-278 (2018).

13. Юнциц В.М., Балобан А.П. Некоторых вопросах исследования литий-ионных аккумуляторных батарей при проведении пожарно-технической экспертизы// Судебная Экспертиза Беларуси. – 2021. – Вып.: 2 (13). – С. 68-74.

14. Уманский Я.С. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия. М.: Металлургия, 1982. – 632 с.

15. Криштал М.М., Ясников И.С., Полунин В.И., Филатов А.М., Ульяненок А.Г. Сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ в примерах практического применения: Москва. Техносфера, 2009. – 208 с.

16. Применение рентгеновских методов анализа в судебной пожарно-технической экспертизе: Методическое пособие. Мокряк А.Ю., Соколова А.Н., Чешко И.Д., Колмаков А.И., Шульгин С.О., Черничук Ю.П. / М.: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2013. – 171 с.

17. Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ: учеб. Пособие для вузов. 4-е изд., доп. и перераб. М.:МИСИС, 2002. – 360 с.

18. Schalkwijk van W. A., Scrosati B., Advances in Lithium-Ion Batteries // Kluwer Academic Publishers, 2002, eBook ISBN978-0-306-47508-5. – P. 513.

Статья поступила в редакцию 29.01.2024

Статья принята к публикации 15.03.2024

УДК: 614.849

EDN: UNHDQQ

**МОДЕЛЬ АВАРИЙНОЙ УТЕЧКИ ВОДОРОДСОДЕРЖАЩЕГО ГАЗА В ВЕНТИЛИРУЕМОМ
ПОМЕЩЕНИИ В ПРОГРАММНОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ *FIRE DYNAMICS SIMULATOR (FDS)***

© Авторы 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)

SPIN: 8830-4253

AuthorID: 1020610

ORCID: 0000-0003-4651-8513

ResearcherID: JYC-6539-2024

САМИГУЛЛИН Гафур Халафович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России

(196105, Санкт-Петербург, Московский пр, д. 149, e-mail: samigullin.g@igps.ru)

SPIN: 1739-4507

AuthorID: 974531

ORCID: 0000-0002-4907-1024

БУЛАТОВ Вячеслав Олегович, кандидат технических наук,

доцент кафедры криминалистики и инженерно-технических экспертиз

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России

(196105, Санкт-Петербург, Московский пр, д. 149, e-mail: 79112231238@ya.ru)

Аннотация. В данном исследовании поднимается проблема оценки взрывопожарной опасности объектов производства и обращения водородсодержащего газа, а также проблема проведения натурных экспериментов вследствие их значительной длительности, ресурсоемкости и дороговизны, а также наличия существенных ограничений доступа на объекты водородной энергетики. В связи с заданной проблемой были поставлены задачи по разработке метода моделирования аварийной утечки водородсодержащего газа в помещении с приточно-вытяжной вентиляцией с нормативной кратностью воздухообмена в программе *FDS*, корректно описывающей термодинамические процессы как для лабораторной «кратной» модели, так и для «полноразмерного» технологического помещения на примере помещения электролизной. Авторами построена численная модель утечки водородсодержащего газа на примере производственного помещения, оснащенного приточно-вытяжной вентиляцией с использованием *CFD*-пакета «Симулятор динамики огня». По результатам полученных графиков изменения концентрации в различных пространственных точках в период аварийной утечки. По мнению авторов, предложенная расчётная модель, в свою очередь, позволит прогнозировать поведение созданной лабораторной «кратной» натурной модели и, в свою очередь, позволит корректно прогнозировать поведение реального производственного объекта с использованием водорода в технологическом процессе.

Ключевые слова: водородсодержащий газ, моделирование аварийной утечки, вентиляция, модель, метод, изменение концентрации, газоанализатор.

**MODEL OF ACCIDENTAL LEAKAGE OF HYDROGEN GAS IN A ROOM WITH SUPPLY
AND EXHAUST VENTILATION IN *FIRE DYNAMICS SIMULATOR (FDS)***

© The Author(s) 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)

SAMIGULLIN Gafur Khalafovich, doctor of technical sciences, professor, professor of the Department of Fire Safety of Technological Processes and Productions

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

(196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149, e-mail: samigullin.g@igps.ru)

BULATOV Vyacheslav Olegovich, candidate of technical sciences, associate professor of the Department of Criminalistics and Engineering and Technical Expertise

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

(196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149, e-mail: 79112231238@ya.ru)

Abstract. This study addresses the problem of assessing the explosion and fire hazard of hydrogen-containing gas production and handling facilities, as well as the problem of conducting full-scale experiments due to their significant

duration, resource-intensive and expensive, as well as the presence of significant restrictions on access to hydrogen energy facilities. In connection with the given problem the tasks on development of the method of modeling of emergency leakage of hydrogen-containing gas in the room with supply and exhaust ventilation with normative air exchange ratio in *FDS* program, correctly describing thermodynamic processes both for laboratory "multiple" model and for "full-size" technological room on the example of electrolysis room were set. The authors have built a numerical model of hydrogen-containing gas leakage on the example of a production room equipped with supply and exhaust ventilation using the *CFD* package "Fire Dynamics Simulator". According to the results of the obtained graphs of concentration changes in different spatial points during the period of emergency leakage. According to the authors, the proposed computational model, in turn, will allow predicting the behavior of the created laboratory "multiple" natural model and, in turn, will allow correctly predicting the behavior of a real production facility with the use of hydrogen in the technological process.

Keywords: hydrogen gas, emergency leakage modeling, ventilation, model, method, concentration change, gas analyzer.

Для цитирования: Тимошенко А.Л. Модель аварийной утечки водородсодержащего газа в вентилируемом помещении в программном обеспечении *Fire Dynamics Simulator (FDS)* / А.Л. Тимошенко, Г.Х. Самигуллин, В.О. Булатов // *XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс*. – 2024. – Т. 13. – № 1(65). – С. 176-187. – EDN: UNHDQQ.

Введение. Основы вычислительной газодинамики широко применяются при исследовании таких процессов, как особенности развития опасных факторов пожара и распространение ударных волн, движение воздушных потоков, пылевоздушных облаков, горючих и токсичных газов. Понимание механизмов движения газа имеет важное значение для решения задач эффективности аварийной вентиляции, связанных с взрывопожаробезопасностью объектов водородной энергетики. В последние годы наблюдается существенное развитие в области вычислительных технологий, в которых все большее применение получают методы вычислительной газо- и гидродинамики, называемые *CFD*-методами (*computational fluid dynamics*). Решение таких задач возможно с помощью таких программных *CFD*-пакетов как *Flow Vision*, *Ansys CFX*, *Comsol Multiphysics*, *Ansys Fluent*, *Star-CCM+*, *OpenFOAM*, *XFlow* и др. в тех случаях, когда проведение натурных экспериментов затруднительно вследствие их значительной длительности, ресурсоемкости и дороговизны, а также наличия существенных ограничений доступа на объекты водородной энергетики.

За последние десятилетия опубликовано множество исследований, связанных с использованием *CFD* методов, но среди них достаточно много публикаций, касающихся разработок в области аварийных утечек горючего газа [1-7]. За последние пару лет увеличились зарубежные исследования, связанные с использованием *CFD* методов, нейросетей и машинного обучения в области аварийных утечек водорода [8-18].

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.

Цель проводимого исследования – предупреждение взрыва газозаполненного облака водородсодержащего газа (далее ВСГ) в объеме помещения, в

технологическом процессе которого обращается ВСГ, путем научно-практического обоснования внесения изменений в алгоритм обеспечения взрывозащиты объекта с сокращением периода времени от начала аварийной утечки и достижения концентрации срабатывания сигнализации (остановки работы технологического оборудования).

Для достижения поставленной цели необходима 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.). Учитывая существующие методики и нормативные требования при проектировании расположения вентиляционных систем и автоматических газоанализаторов, а также результаты моделирования концентрационного поля при определенном режиме вентиляции, проектировщик сможет оценить эффективность взаимного расположения системы вентиляции и газоанализаторов в рассматриваемом помещении и провести их оптимизацию.

В связи с вышеизложенным, авторами на данном этапе поставлена следующая задача – разработать метод моделирования аварийной утечки ВСГ в помещении с приточно-вытяжной вентиляцией в программе *FDS*, реализующей численно полевой дифференциальный метод и корректно описывающей термодинамические процессы как для лабораторной «кратной» модели, так и для «полноразмерного» технологического помещения электролизного цеха.

К слову, в руководстве пользователя *FDS* и его графического интерфейса *Pyrosim* [19] не уделяется достаточно внимания детальному описанию создания моделей утечек газовых смесей.

Методология. Построена численная модель утечки ВСГ на примере производственного помещения, оснащенного приточно-вытяжной вентиляцией с использованием *CFD*-пакета «Симулятор динамики огня» (*Fire Dynamics Simulator*; или *FDS*,

препроцессор *Pyrosim version 6.7.4*).

Порядок моделирования аварийной вентиляции при аварийной утечке водородсодержащего газа определен в соответствии с рекомендациями [21-28], а также на основе видео-уроков ютуб-канала *FireCat* [29] (официального представителя разработчика ПО *Pyrosim* в РФ).

В соответствии с исходными размерами в расчетной области было выбрано значение сетки в 128 000 ячеек. Указанный размер ячейки выбран из соображения минимизации времени расчета при сохранении его удовлетворительной точности.

Интерфейс *Pyrosim* позволяет спроектировать различные режимы вентиляции. В нашем случае используется приточно-вытяжная вентиляция. Для этого необходимо создать поверхность с типом поверхности: «Приток/Вытяжка».

Для 3D-визуализации газовых потоков и концентрации в объеме сетки создано 3D-сечение, отображающее концентрацию газообразного водорода (рис. 1).

Обращаясь к отмененному нормативно-правовому акту, регламентирующему правила безопасности при электролизе воды [20], следует обратить внимание на пункт 8.5, в котором изложено: «Помещения категории А, где обращается водород, должны быть обеспечены автоматическими газоанализаторами с устройством световой и зву-

ковой сигнализации, срабатывающими при содержании водорода в воздухе помещения не более 10% от нижнего предела взрываемости (0,4% объемн.) и кислорода менее 19% и более 23%». При этом стоит отметить следующий подпункт: «Количество и место расположения газоанализаторов должны определяться проектной организацией из расчета: для водорода – одна точка отбора на каждые 100 м² площади, но не менее одного датчика на помещение; для кислорода – одна точка на помещение. Рекомендуется устанавливать в электролизерных отделениях и водородных компрессорных точки отбора над каждым агрегатом (под самым потолком), где вероятны выделения водорода в помещение, но не далее 3 м от источника по горизонтали». При этом пункт 8.6 гласит о том, что при содержании водорода в воздухе производственного помещения выше 25% от нижнего предела взрываемости (1% объемн.) водорода методом электролиза воды по сигналу от автоматического газоанализатора технологическое оборудование этого помещения должно быть остановлено. Соответственно, $\varphi_{\text{сигн}} = 10\%$ НКПР и $\varphi_{\text{откл}} = 25\%$ НКПР.

Для отслеживания в объеме сетки изменения концентрации газа под потолком помещения в радиусе 3 метров были выставлены «измерители в газовой среде» (автоматические газоанализаторы) (рис. 2).

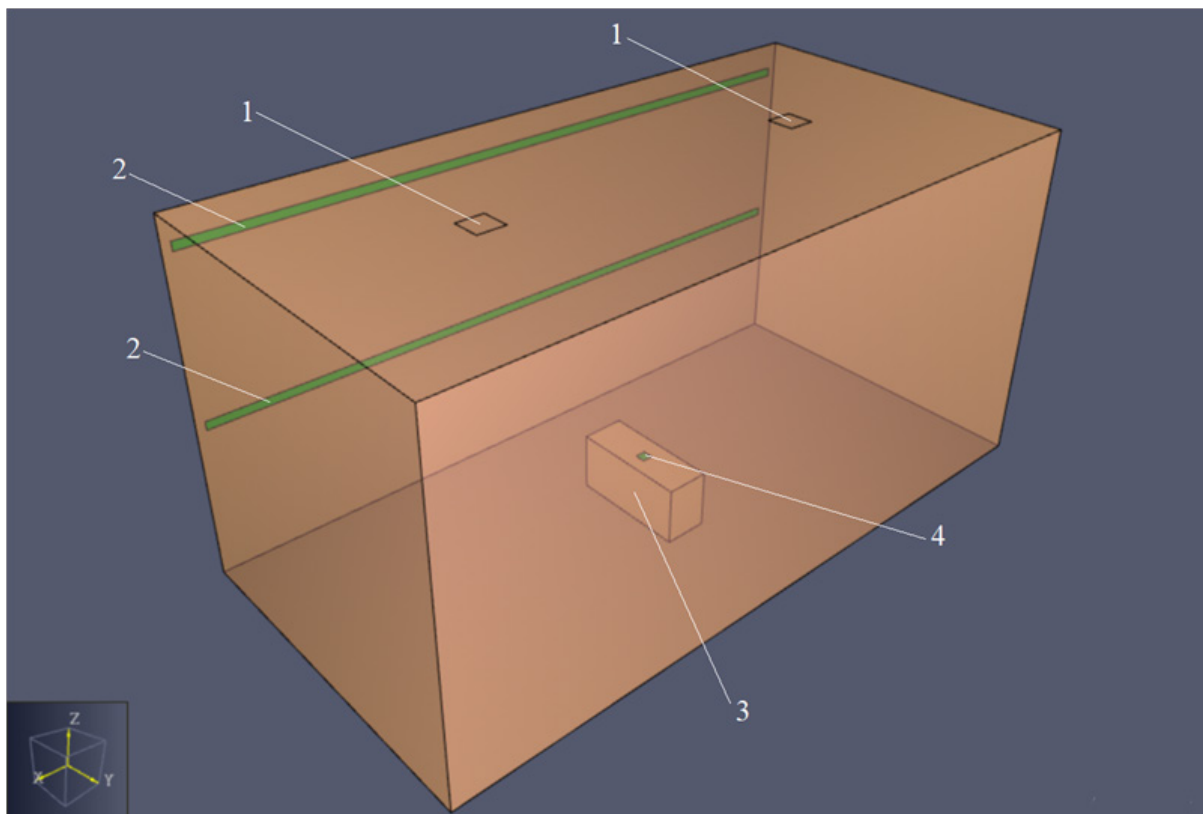


Рисунок 1 – Трехмерное представление расчетной модели помещения электролизной объекта водородной энергетики, реализованного в современной версии FDS:

1 – вентиляционные дефлекторы для вытяжки; 2 – приточные клапаны в оконных проемах;
3 – электролизер типа СЭУ-4М; 4 – источник аварийной утечки

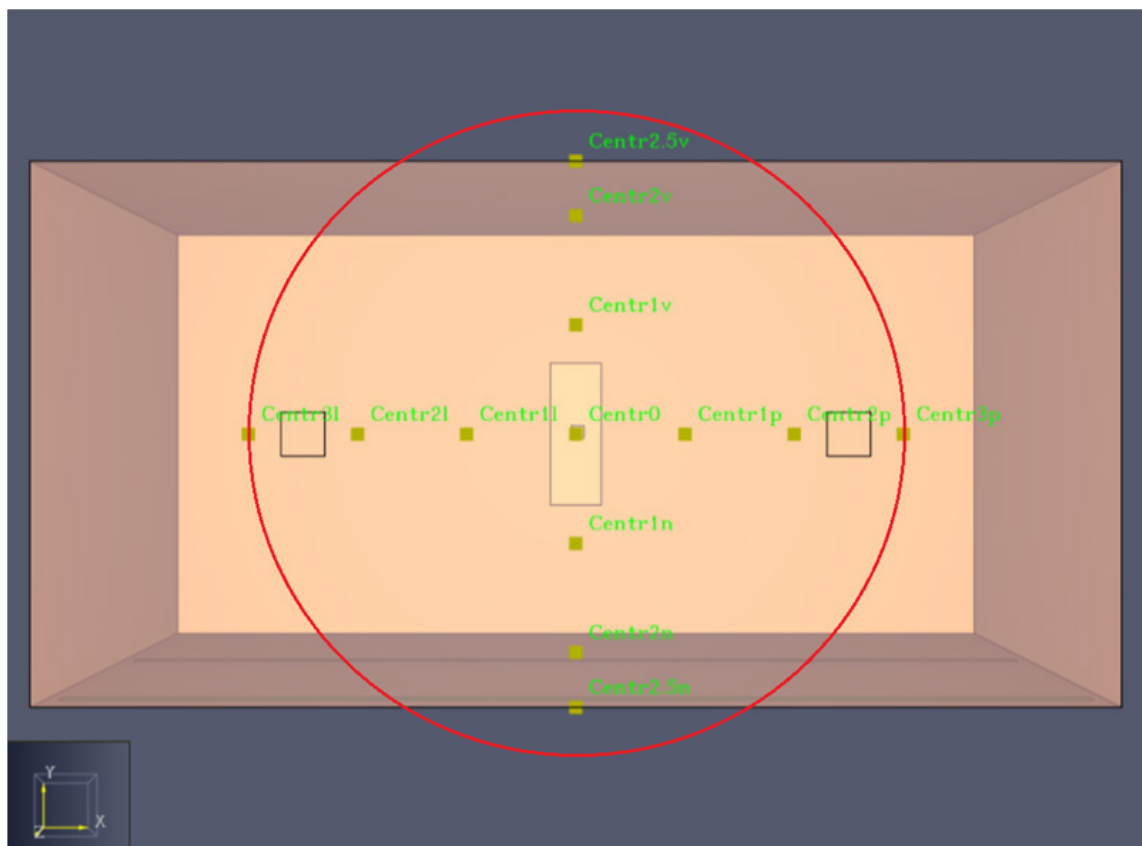


Рисунок 2 – Расположение автоматических газоанализаторов под потолком помещения электролизной в радиусе 3 метров

Расчетное время отключения трубопроводов определяют в каждом конкретном случае, исходя из реальной обстановки, и должно быть минимальным с учетом паспортных данных на запорные устройства, характера технологического процесса и вида расчетной аварии, либо принимается условное время отключения трубопроводов в случае отказа системы автоматики (120 с и 300 с) [30-33]. В течение этого времени в объем помещения будет поступать горючий газ. Поскольку технологический процесс в электролизных автоматизирован и не требует постоянного присутствия персонала принимается время отключения трубопроводов составляет 120 секунд. Вентиляция работает непрерывно от начала и до момента окончания моделирования (600 секунд).

За аварийную ситуацию примем разрушение одного из запорных устройств технологического трубопровода, находящегося под давлением, и дальнейшую аварийную утечку водородсодержащего газа.

В соответствии с 5.5 [20] «Помещения электролиза, очистки и осушки водорода, компрессорной, наполнительной и другие помещения, где возможно выделение водорода, оборудуются естественной вытяжной вентиляцией из верхней зоны через дефлекторы в объеме не менее однократного в час. Приток воздуха в необходимом объеме должен осуществляться через оконные проемы, оборудованные пылезадерживающими устройствами».

На основании данного пункта располагаем два вытяжных отверстия диаметрами по 0,4 метра с нормативной кратностью воздухообмена 1 ч^{-1} [34] и объемным расходом удаляемого воздуха $3,472 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ каждый в потолке помещения на высоте 5 метров, а также на расстоянии 2,3 метра от стен. Расстояние между центрами вентиляционных отверстий составляет 5,4 метров. А также располагаем два приточных клапана в условных оконных проемах, имеющие объемный расход приточного воздуха $3,472 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ каждый (первый клапан на высоте 2,125 м от пола, второй клапан на высоте 4,5 м от пола. Электролизер типа СЭУ-4М с аварийным трубопроводом расположен в центре помещения.

Исходные параметры моделирования: В соответствии с [37] помещение электролизной, в котором возможно выделение водорода – категория по взрывопожарной опасности – повышенная взрывопожароопасность (А). В соответствии пунктом 7.3.41 Правил устройства электроустановок (ПУЭ) помещение электролизной можно отнести к классу взрывоопасной зоны В-Iа.

Объемный расход водородсодержащего газа марки Б с чистотой водорода 99,95% (суммарная объемная доля кислорода и азота не превышает 0,05%, а массовая концентрация водяных паров не превышает $0,5 \text{ г}/\text{м}^3$ [36]) из аварийного трубопровода $Q_{\text{утечки}} = 1,11 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ (соответствует производительности по водороду электролизной

установки СЭУ-4М).

Габаритные размеры СЭУ-4М – 1,7 х 0,61 х 0,83 м.

Общий объемный расход приточного воздуха

$$Q_{\text{прит}}^{\text{общ}} = 6,944 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Общий объемный расход удаляемого воздуха.

$$Q_{\text{вытяж}}^{\text{общ}} = 6,944 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Время моделирования – 600 с.

Температура, влажность и давление воздуха заданы для нормальных условий.

Электролизный цех, как правило, строится как отдельно стоящее здание и имеет в своем составе два помещения: помещение электролизной цеха КИПиА, иногда в его состав проектируются помещения венткамеры и помещения распределительных устройств собственных нужд (РУСН).

Размеры помещения $a \times b \times h = 10 \times 5 \times 5$ м.

Свободный объем помещения равен 200 м³ (в соответствии с п. А1.4 [СП 12]).

Результаты. По результатам визуализации расчетной модели FDS (рис. 3, 4), в правой части которой расположена шкала «концентрация H_2 », можно сделать вывод о том, что при заданных условиях концентрация водородсодержащего газа не достигает нижнего концентрационного предела распространения пламени (0,003345 кг/м³). Поскольку FDS при построении концентрационных полей и шкал использует единицу измерения в кг/м³, далее мы будем использовать данную единицу измерения концентрации объемной водорода. Максималь-

ная концентрация водородсодержащего газа при заданных условиях достигает значения в 0,001 кг/м³ (30% НКПР). В данном случае работа аварийной вентиляции не позволяет в течении 120 секунд создать концентрацию, превышающую НКПР.

На диаграммах (рис. 3, 4, 5) наглядно изображены изменения концентрации водородсодержащего газа по времени, зафиксированные в различных пространственных точках. Красной пунктирной линией обозначено фоткл значение концентрации 25% от НКПР (0,00084 кг/м³), при котором технологическое оборудование этого помещения должно быть остановлено. Оранжевой – $\varphi_{\text{сигн}}$ значение концентрации 10% от НКПР (0,00033 кг/м³), при достижении которого срабатывает световая и звуковая сигнализация, при котором технологическое оборудование этого помещения должно быть остановлено.

По результатам моделирования распространения водородсодержащего газа при аварийной утечке из технологического трубопровода, находящегося под давлением, на 600 секунде концентрация горючего газа в разных точках помещения не превышала 0,0001 кг/м³ (3% НКПР) (рис. 5).

При рассматриваемом режиме вентиляции в случае вертикального истечения водорода под давлением значения концентрации $\varphi_{\text{сигн}}$ и $\varphi_{\text{откл}}$ наиболее быстро (на 10 секунде на высоте 5 метров) достигаются при расположении газоанализатора над технологическим агрегатом под самым потолком (рис. 6).

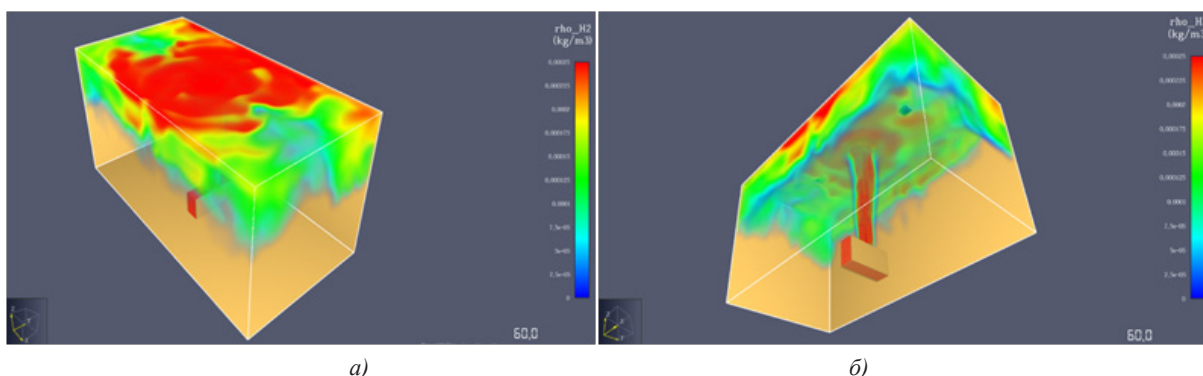


Рисунок 3 – Результаты моделирования распространения водородсодержащего газа при аварийной утечке из технологического трубопровода, находящегося под давлением, на 60 секунде: а); вид сверху; б) вид снизу

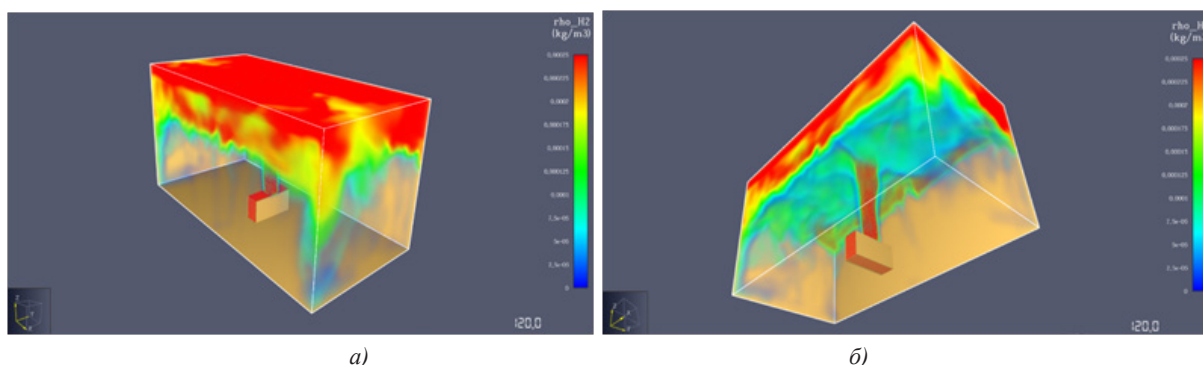


Рисунок 4 – Результаты распространения водородсодержащего газа при аварийной утечке из технологического трубопровода, находящегося под давлением, на 120 секунде: а); вид сверху; б) вид снизу

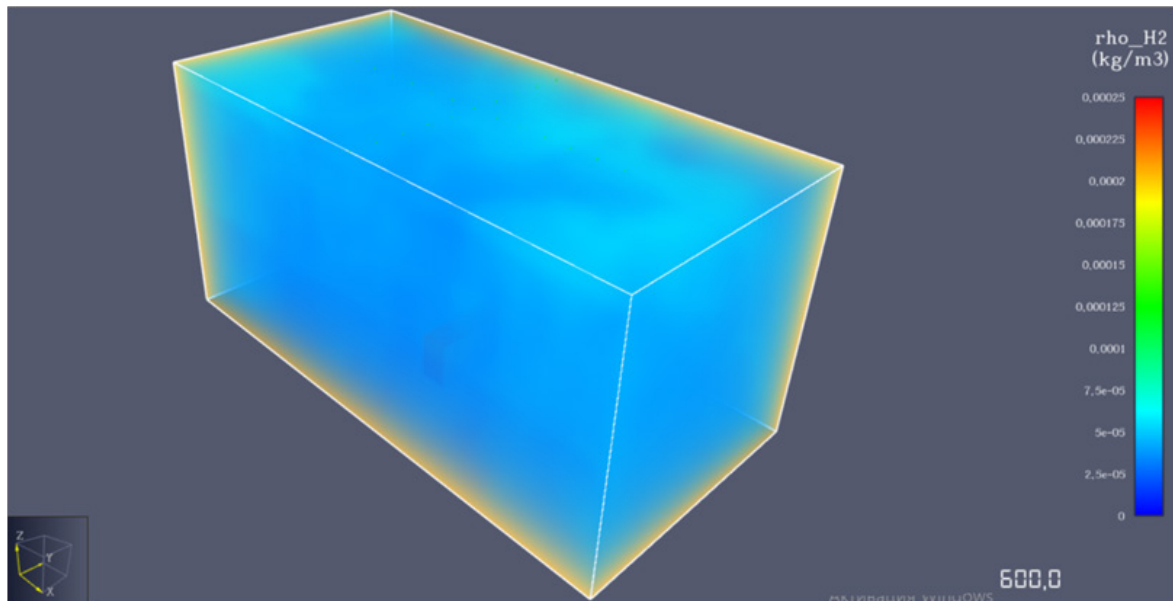


Рисунок 5 – Результаты распространения водородсодержащего газа при аварийной утечке из технологического трубопровода, находящегося под давлением, на 600 секунде

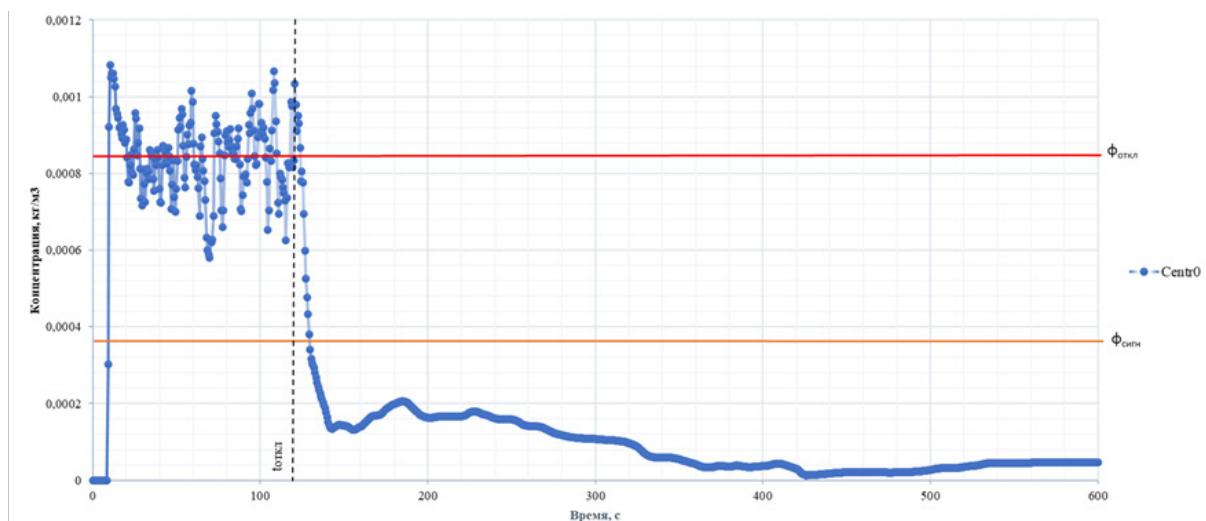


Рисунок 6 – График изменения концентрации водородсодержащего газа в центре помещения на высоте 5 метров (под потолком) над аварийной утечкой (датчик «Centr0»)

При расположении автоматического газоанализатора в точках под потолком западнее от центра на расстоянии 1 метра (датчик «Centr1л») в период истечения водорода (120 секунд) $\varphi_{\text{сигн}}$ достигается на 16 секунде, на расстоянии 2 метров (датчик «Centr2л») в период истечения водорода (120 секунд) $\varphi_{\text{сигн}}$ достигается на 38 секунде, на расстоянии 3 метров (датчик «Centr3л») $\varphi_{\text{сигн}}$ достигается на 128 секунде концентрация H_2 не превышает $\varphi_{\text{откл}}$ (рис. 7).

При расположении автоматического газоанализатора в точках под потолком восточнее от центра на расстоянии 1 метра (датчик «Centr1п») в период истечения водорода (120 секунд) $\varphi_{\text{сигн}}$ достигается на 17 секунде, на расстоянии 2 метров (датчик «Centr2п») в период истечения водорода (120 секунд) $\varphi_{\text{сигн}}$ достигается на 31 секунде, концентрация H_2 не превышает $\varphi_{\text{откл}}$, на расстоянии 3 метров (датчик «Centr3п») $\varphi_{\text{сигн}}$ не достигается (рис. 8).

При расположении автоматического газоанализатора в точках под потолком севернее от центра на расстоянии 1 метра (датчик «Centr1н») в период истечения водорода (120 секунд) $\varphi_{\text{сигн}}$ достигается на 17 секунде, на расстоянии 2 метров (датчик «Centr2н») в период истечения водорода (120 секунд) $\varphi_{\text{сигн}}$ достигается на 28 секунде, на расстоянии 3 метров (датчик «Centr2.5н») $\varphi_{\text{сигн}}$ достигается на 57 секунде, концентрация H_2 не превышает $\varphi_{\text{откл}}$ (рис. 9).

При расположении автоматического газоанализатора в точках под потолком севернее от центра на расстоянии 1 метра (датчик «Centr1н») в период истечения водорода (120 секунд) $\varphi_{\text{сигн}}$ достигается на 16 секунде, на расстоянии 2 метров (датчик «Centr2н») в период истечения водорода (120 секунд) $\varphi_{\text{сигн}}$ достигается на 32 секунде, на расстоянии 3 метров (датчик «Centr2.5н») $\varphi_{\text{сигн}}$ достигается на 46 секунде, концентрация H_2 не превышает $\varphi_{\text{откл}}$ (рис. 10).

По полученным данным (значениям периодов времени от начала аварийной утечки и достижения концентрации срабатывания сигнализации (остановки работы технологического оборудования) при расположении газоанализатора под потолком, делаем вывод, что при рассматриваемом режиме вентиляции наиболее короткий периода времени от начала аварийной утечки и достижения концентрации срабатывания сигнализации отмечен в точке расположения датчика «Centr0» (на 10 секунде),

следовательно, при соблюдении требований нормативных документов эффективнее располагать газоанализатор в центре под потолком (рис. 11).

Однако, в случае невозможности установки газоанализатора в центре помещения делаем вывод, что эффективнее располагать газоанализатор в точке под потолком западнее от центра на расстоянии 1 метра (датчик «Centr1l») и в точке под потолком севернее от центра на расстоянии 1 метра (датчик «Centr1n»).

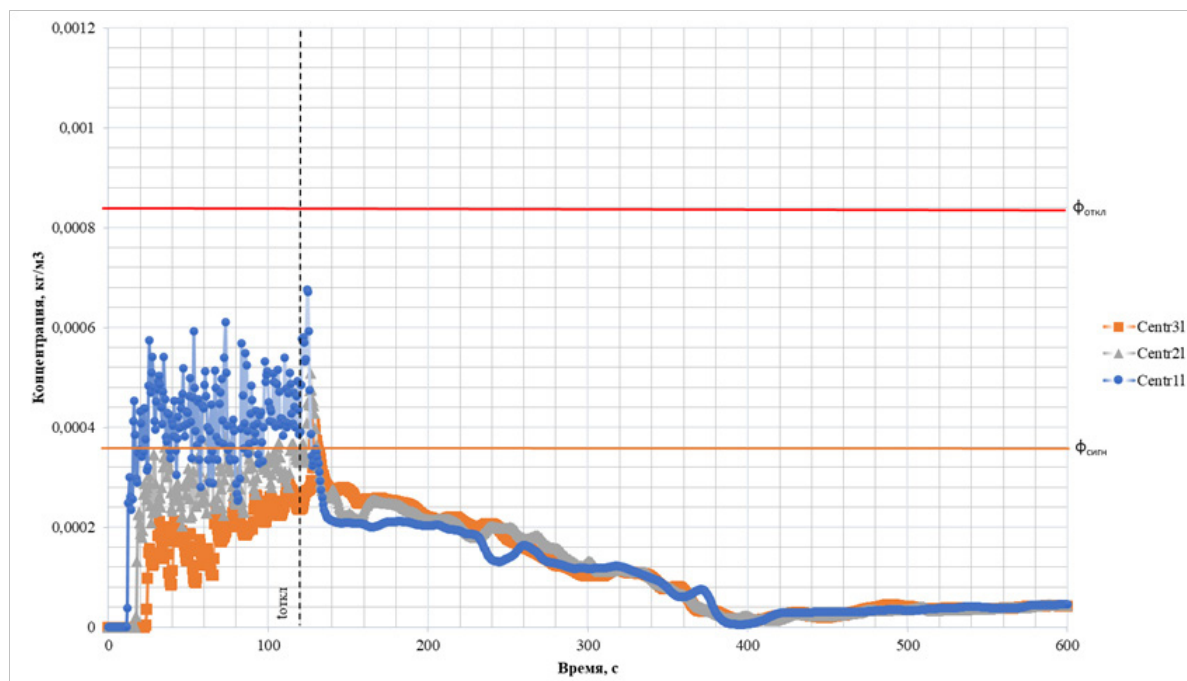


Рисунок 7 – График изменения концентрации водородсодержащего газа в точках западнее от центра потолка помещения на расстоянии 1 м (датчик «Centr1l»), 2 м (датчик «Centr2l»), 3 м (датчик «Centr3l»)

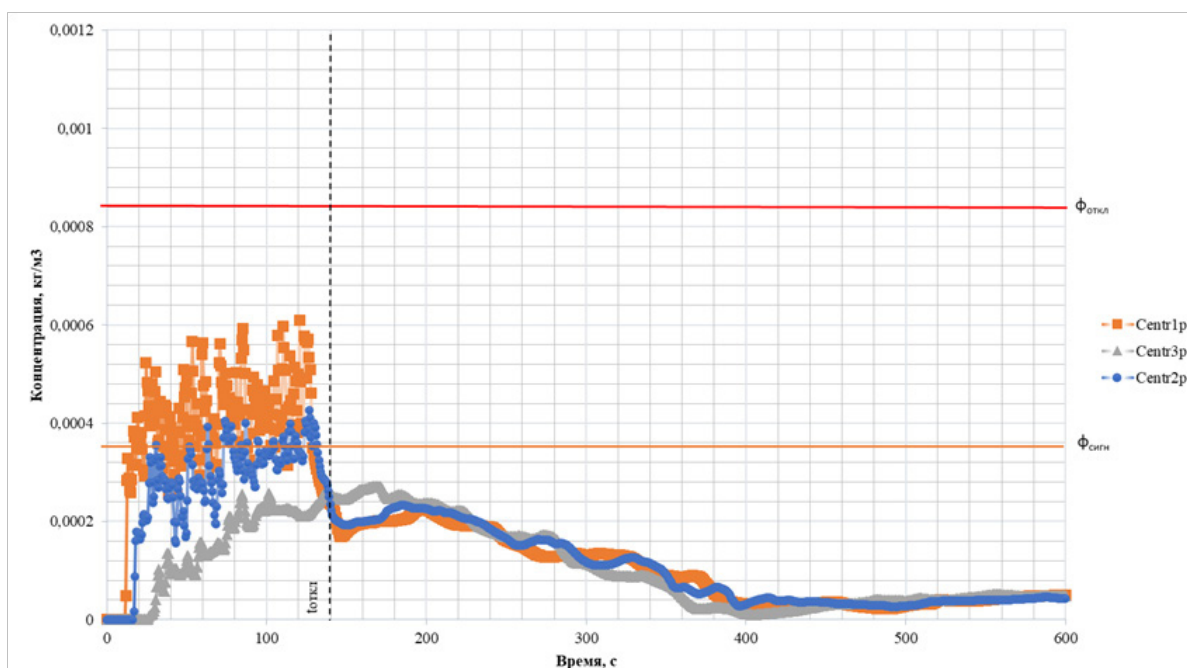


Рисунок 8 – График изменения концентрации водородсодержащего газа в точках восточнее от центра потолка помещения на расстоянии 1 м (датчик «Centr1p»), 2 м (датчик «Centr2p»), 3 м (датчик «Centr3p»)

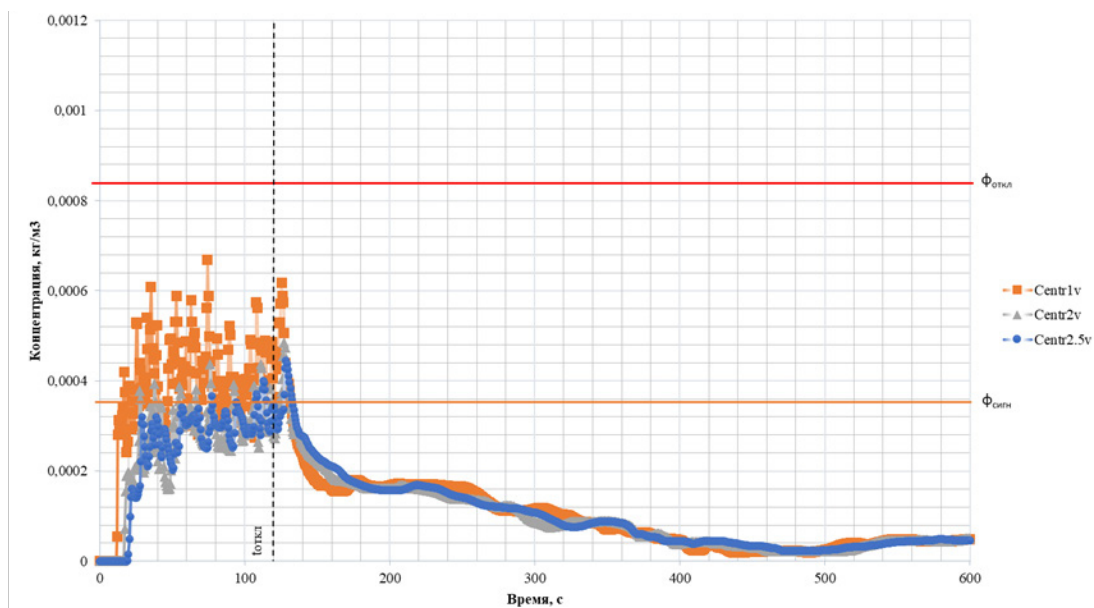


Рисунок 9 – График изменения концентрации водородсодержащего газа в точках севернее от центра потолка помещения на расстоянии 1 м (датчик «Centr1v»), 2 м (датчик «Centr2v»), 3 м (датчик «Centr3v»)

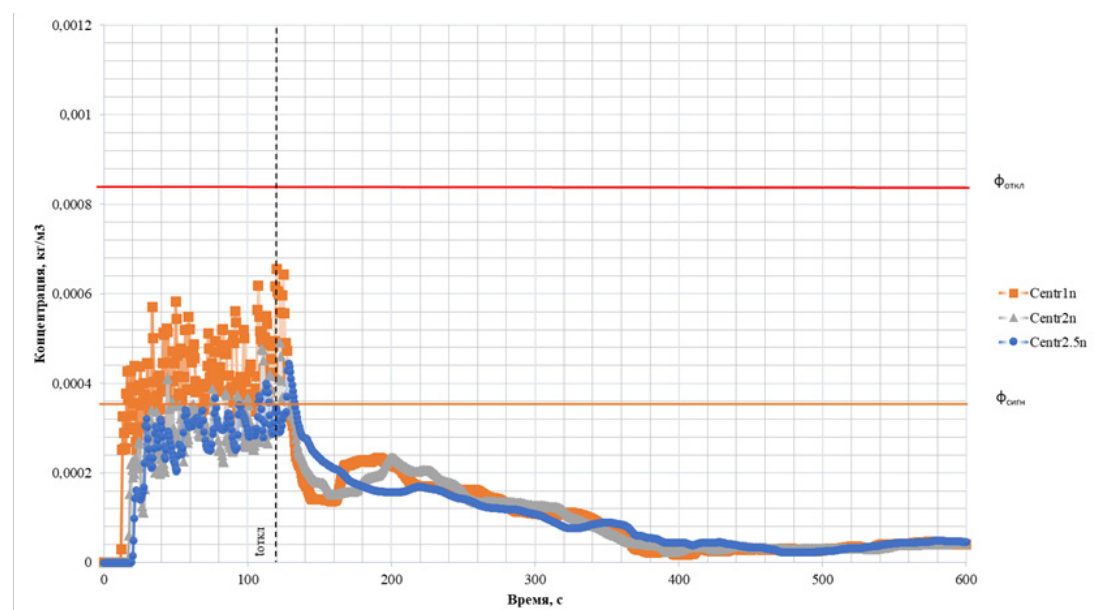


Рисунок 10 – График изменения концентрации водородсодержащего газа в точках южнее от центра потолка помещения на расстоянии 1 м (датчик «Centr1n»), 2 м (датчик «Centr2n»), 3 м (датчик «Centr3n»)

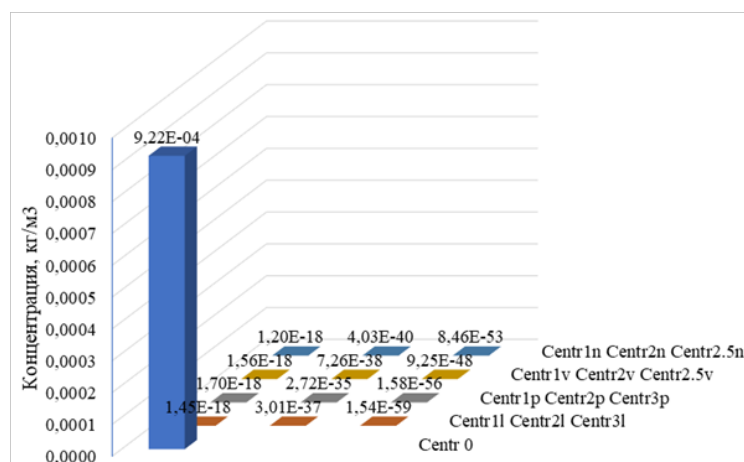


Рисунок 11 – Концентрационное поле на момент времени аварии 10 секунд

Обсуждение. Как видно из графика изменения концентрации в точке в центре под потолком (рис. 5), кривая концентрации резко увеличивается в первые 15 секунд, затем в течение 120 секунд динамично изменяется, поочередно убывая и возрастающая. Впоследствии после перекрытия запорного устройства (от 120 до 600 секунд) концентрация водорода снижается. В точках, находящихся в углах помещения, наблюдается плавно увеличение концентрации с незначительными снижениями (рис. 7-10) в течение 120 секунд и также впоследствии ее снижение. Данный эффект связан с расположением приточно-вытяжной вентиляции, а также значениями объемного расхода приточного/удаляемого воздуха.

В рамках проведенного исследования была создана «кратная» лабораторная установка для моделирования аварийных утечек ВСГ с геометрическим коэффициентом подобия, равным десяти, а также компьютерная (математическая) модель лабораторной установки для апробации полученных результатов. Полученные в ходе исследования результаты моделирования нашли применение в апробации и сравнении с результатами эксперимента, способ проведения которого был обсужден на XI Международном научном семинаре-конференции «Пожарная безопасность в условиях современности» [35].

Одним из условий обеспечения пожарной безопасности объекта защиты при выполнении в полном объеме требований пожарной безопасности, установленных ФЗ-123 является пункт 5, где сказано, о том, что результаты исследований, расчетов и (или) испытаний подтверждают обеспечение пожарной безопасности объекта защиты в соответствии с выполнением порядка проведения расчетов по оценке пожарного риска, определенным нормативными правовыми актами Российской Федерации и нормативными документами по пожарной безопасности.

Так, в исследованиях [39, 40] в соответствии с нормативными требованиями по пожарной безопасности [31-33, 41-43] были рассмотрены причины возникновения аварийных утечек, а также возможные случаи отказов, выполнены расчеты оценки риска (возможного ущерба, вероятностей сценариев аварийных событий и т.д.), который может понести электролизный цех при производстве взрывопожароопасного водорода.

Недопустимо исключать ситуации с утечкой водорода в цехах получения, компримирования и использования, и причиной этому может служить следующее:

- снижение уровня масла в системе уплотнения и через фланцевое соединение каплеотделителя в компрессоре;
- неплотности в электролизере и их возрастание при увеличении числа электролизеров;
- малоцикловая и обычная усталость; температурные перенапряжения вследствие пусков и остановок; высокая рабочая температура камер

сгорания (выше, чем температура самовоспламенения водорода) и т.д.

Отказ оборудования может возникнуть по следующим причинам:

1. Поломка электролизного оборудования, включающая в себя в том числе отказ в запуске на выработку кислорода и водорода и разгерметизацию с выходом взрывоопасного водорода;
2. Пожар в электролизном цехе;
3. Взрыв в электролизном цехе.

Из анализа крупных промышленных аварий, связанных с утечкой большой массы водорода в закрытых помещениях и на открытой местности, можно сделать вывод, что вероятности взрыва и пожара при отсутствии датчиков по содержанию водорода в зданиях оцениваются в 9% и 88% соответственно. В 3% случаев при разгерметизации оборудования процессы протекают без горения, дефлаграции и детонации. Так как при разгерметизации оборудования под высоким давлением происходит физический взрыв с выделением энергии, то большая его часть переходит в основном в энергию ударной волны и кинетическую энергию осколков. При невоспламенении высвободившегося водорода в смеси с воздухом, находящегося в электролизном цехе, предусмотрены автоматические защиты по срабатыванию на содержание в помещении водорода, вероятность несрабатывания которых оценивается в 1%.

С целью минимизации случаев взрывопожароопасных ситуаций предложены следующие рекомендации:

1. Для уменьшения вероятности утечек водорода из емкостей хранения в атмосферу предпочтительно их размещать в подземном исполнении. Аналогичным образом следует прокладывать водородопроводную сеть, соединяющую емкости хранения с цехами компримирования, получения и использования водорода.
2. Проведение постоянного контроля и своевременного технического освидетельствования (проведение гидравлических испытаний и осмотров).
3. Минимизировать годовой риск можно за счет форсирования мощности в работе электролизной установки путем повышения ее производительности по водороду и кислороду.
4. Использовать современные компьютерные методы оценки и диагностики уровня взрывопожароопасности технологического оборудования [44].
5. При аварийной разгерметизации электролизера система вентиляции помещения должна обеспечивать его эффективное удаление во избежание образования взрывоопасной водородно-воздушной смеси.

Методика оценки последствий взрывобезопасности объектов должна учитывать разные параметры аварийной ситуации, например, массовый расход топлива при утечке, конфигурацию помещений, характеристики вентиляционных систем.

Для ее уточнения требуются экспериментальные исследования по заполнению водородом помещения с массовым расходом, соответствующим утечке в предполагаемой аварийной ситуации [45–47].

Отдельно следует упомянуть особую опасность проведения некоторых натурных «полноразмерных» экспериментов с утечками горючих газов ввиду риска получения объемного взрыва с серьёзными разрушениями на значительной площади. Поэтому для решения поставленных задач применяют «кратные» натурные эксперименты на масштабной модели исследуемого объекта в лабораторных (полигонных) условиях и вычислительные эксперименты на ЭВМ, моделирующие как «кратную», так и «полноразмерную» модель исследуемого объекта, что позволяет с одной стороны, снизить риски разрушений и стоимость натурных экспериментов, а с другой стороны, повысить наглядность и достоверность проводимых исследований в целом. Однако, проведение «кратных» экспериментов также несет за собой опасность взрыва в замкнутом объеме, поэтому очень важно при его проведении соблюдать правила техники безопасности и охраны труда.

Важно для более корректного сравнения и апробации данных на реальном объекте при создании наиболее точной «кратной» модели не забывать и про удовлетворения ряда критериев подобия, таких как геометрического (C_l), кинематического (C_u), Фурье (F_o – процесс нестационарный), Грасгофа (G_r – конвекция), Фруда (F_r), Пекле (P_e), Маха (M), Рейнольдса (R_e) и других.

В данной математической модели температура обрабатываемого ВСГ и атмосферного воздуха в помещении равны (20°C). Однако, полевая модель *FDS* с помощью *HVAC* («отопление, вентиляция, кондиционирование») позволяет, в числе прочего, с помощью элемента «теплообменник», «понижать» или «повышать» температуру подаваемого в исследуемую систему газа.

Проводимые исследования идут от простого к сложному, как в числовом, так и в кратном экспериментах. Инструментарий *FDS*, безусловно, обладает широчайшими возможностями. Однако, без тонкой настройки модели и её проверки на натурной или кратной модели, весьма высок риск грубых ошибок по различным причинам (от «арифметических» ошибок исследователя, до погрешностей самой расчётной модели или неточностей при её использования из-за недостаточного понимания применяемых моделей процессов и принятых при этом ограничений и допущений).

Выводы. Разработан метод моделирования аварийных утечек водородсодержащего газа с помощью полевого метода моделирования с использованием вычислительного процессора *FDS* и графического интерфейса *PyroSim*, реализующей математические модели физико-химических процессов высочайшей сложности. Стоит отметить,

что данный метод применим при моделировании аварийных утечек других горючих и негорючих газов. Спроектирована модель приточно-вытяжной вентиляции при аварийной утечке водородсодержащего газа на примере объекта водородной энергетики. По результатам полученных графиков изменения концентрации в различных пространственных точках в период аварийной утечки сделан вывод о том, что при заданных условиях технологического процесса НКПР не достигается. Предложен метод определения места расположения газоанализатора в помещении электролизной с помощью программного обеспечения *FDS*. Максимальная концентрация водородсодержащего газа при заданных условиях достигает значения в 0,001 кг/м³ (30% НКПР). Рассмотрены исследования, связанные с оценкой пожарного риска электролизного цеха. Предложены рекомендации по предотвращению утечек и взрыва водородо-воздушных смесей в электролизном цехе.

Предложенная расчётная модель, в свою очередь, позволит прогнозировать поведение созданной лабораторной «кратной» натурной модели и, в свою очередь, позволит корректно прогнозировать поведение реального производственного объекта с использованием водорода в технологическом процессе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Казаков Б.П., Колесов Е.В., Накаряков Е.В., Исаевич А.Г. Обзор моделей и методов расчета аэрогазодинамических процессов в вентиляционных сетях шахт и рудников // ГИАБ. – 2021. – №6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-modelей-i-metodov-rascheta-aerogazodinamicheskikh-protsessov-v-ventilyatsionnyh-setyah-shaht-i-rudnikov> (дата обращения: 18.01.2024).
2. Бобырева, Т. Н. Анализ методик определения размеров взрывоопасных зон при аварии в открытом пространстве / Т.Н. Бобырева // Актуальные вопросы естествознания: Сборник материалов VIII Всероссийской научно-практической конференции, Иваново, 30 марта 2023 года / Сост.: Т.В. Фролова. – Иваново: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий», 2023. – С. 210–212.
3. Риск образования взрывоопасной газовой смеси при использовании природного газа в быту / В.С. Кожиченков, Т.Н. Киселева, С.Н. Фокин [и др.] // Безопасность жизнедеятельности. – 2018. – № 7(211). – С. 29–35.
4. Харламенков А.С. Сравнительный анализ размеров взрывоопасных зон, рассчитанных по методикам национальных и международных стандартов / А.С. Харламенков, Ю.О. Елестратова, А.Г. Марков // Проблемы техносферной безопасности: материалы международной научно-практической конференции молодых учёных и специалистов. – 2019. – № 8. – С. 184–188.
5. Miralles Schleder, Adriana & Ramos Martins, Marcelo. (2013). Comparative Evaluation of the Cloud Dispersion of a Liquefied Natural Gas Leakage Using the UDM and a CFD Model. Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE. 7. 10.1115/OMAE2013-10901.
6. Liu, Yuchuan & Wang, Jian. (2022). Numerical Simulation Analysis of Fire Hazard from Leakage and Diffusion of Vinyl Chloride in Different Atmospheric Environments. Fire. 5. 36. 10.3390/fire5020036.

7. Hou, Q. & Jiao, W. (2011). Improved FDS analysis for the atmospheric impact of natural gas leakage and diffusion. *Journal of Computational Information Systems*. 7. 4702-4709.
8. Tian, Tiantian & Lu, Chen & Ha, Wenlong & Zhao, Yiming & Hua, Zhengli & Peng, Wenzhu & Gu, Chaohua. (2023). CFD Study on High-Pressure Hydrogen Leakage and Explosion of Hydrogen Energy Tram in Tunnel. 10.1115/PVP2023-106868.
9. Xie, Hanguang & Makarov, Dmitriy & Kashkarov, Sergii & Molkov, Vladimir. (2023). CFD Simulations of Hydrogen Tank Fuelling: Sensitivity to Turbulence Model and Grid Resolution. *Hydrogen*. 4. 1001-1021. 10.3390/hydrogen4040058.
10. Gelain, Thomas & Prevost, Corinne & Liatimi, Nadia. (2023). Assessment of CFD codes capabilities to predict the risk of flammability or explosivity in the event of a hydrogen leak in nuclear facilities. *The Proceedings of the International Conference on Nuclear Engineering (ICONE)*. 2023.30. 1681. 10.1299/jsmeicone.2023.30.1681.
11. Hydrogen Leakage Inside a Storage Warehouse and Local Combustion Threats (2024): A Numerical Study. 10.1007/978-981-99-5990-7_51.
12. Chung, Tae-Yong & Ahn, Jae-Uk & Nam, Jin Hyun & Shin, Donghoon & Kim, Young-Gyu. (2007). A CFD Study on Unsteady and Steady State of the Hydrogen Leakage for Residential Fuel Cell System. *Journal of the Korean Institute of Gas*. 11.
13. Patel, Parth & Garaniya, Vikram & Baalisampang, Til & Arzaghi, Ehsan & Mohammadpour, Javad & Abbassi, Rouzbeh & Salehi, Fatemeh. (2023). Machine Learning Regression-CFD Models for Predicting Hydrogen Dispersion in a Naturally Ventilated Area. 10.1115/OMAE2023-104522.
14. Yassin, Khaled & Kelm, Stephan & Kampili, Manohar & Reinecke, Ernst-Armdt. (2023). Validation and Verification of containmentFOAMCFD Simulations in Hydrogen Safety. *Energies*. 16. 5993. 10.3390/en16165993.
15. Li, Hao & Cao, Xuwen & Teng, Lin & Wu, Yi & Bian, Jiang. (2022). Numerical Simulation of Accidental Leakage and Diffusion of Liquid Hydrogen in the Laboratory. 10.1115/IMECE2022-96711.
16. Yuan, Wenhao & Li, Jingfeng & Zhang, Ruiping & Li, Xinkun & Xie, Junlong & Chen, Jianye. (2022). Numerical investigation of the leakage and explosion scenarios in China's first liquid hydrogen refueling station. *International Journal of Hydrogen Energy*. 47. 10.1016/j.ijhydene.2022.04.060.
17. Malakhov, A. & Avdeenkov, A.V. & Du Toit, Maria & Bessarabov, D.G. (2020). CFD simulation and experimental study of a hydrogen leak in a semi-closed space with the purpose of risk mitigation. *International Journal of Hydrogen Energy*. 45. 10.1016/j.ijhydene.2020.01.035.
18. Shao, X. & Pu, L. & Lei, G. & Li, Q. & Li, Y. (2018). Investigation on the Hydrogen Flammable Cloud Dispersion in Liquid Hydrogen Leakage Accident. Hsi-An Chiao Tung Ta Hsueh/Journal of Xi'an Jiaotong University. 52. 102-108. 10.7652/xjtub201809014.
19. Руководство пользователя PyroSim 2023. URL: https://www.pyrosim.ru/download/Pyrosim_manual.pdf (дата обращения: 18.01.2024).
20. 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).
21. Маркус Е.С. Численное моделирование пожара с помощью Fire Dynamics Simulator: учеб. пособие / Е.С. Маркус, А.Ю. Снегирев, Е.А. Кузнецов – СПб: Изд-во Политехн. ун-та. – 2021. – 173 с.
22. Прогнозирование опасных факторов пожара. Учебник / под ред. С.В. Пузача; Ю.А. Кошмаров, С.В. Пузач, О.С. Лебедченко, Нгуен Тхань Хай – М.: Академия ГПС МЧС России, 2019. – 143 с.
23. Применение полевого моделирования динамики пожара для оценки эффективности систем противопожарной защиты: учебное пособие. СПб.: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2022. – 100 с.
24. Применению полевого моделирования для оценки эффективности работы систем противопожарной защиты: Методическое пособие / С.Ф. Лобова, Н. В. Петрова, И.Р. Хасанов, А.В. Карпов, Б.Б. Колчев, – СПб: ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2020. – 69 с.
25. Агеев П.М., Голиков А.Д., Лобова С.Ф., Тумановский А.А., Чешко У.Д. Расчетные методы // судебной пожарно-технической экспертизе: Методическое пособие / Под ред. А.А. Тумановского и И.Д. Чешко. – СПб: СПОФ ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2011 – 110 с.
26. Агеев П.М., Голиков А.Д., Лобова С.Ф., Тумановский А.А., Чешко И.Д. Расчетные методы в судебной пожарно-технической экспертизе: Методическое пособие / Под ред. А.А. Тумановского и И.Д. Чешко. – СПб: СПОФ ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2011 – 110 с.
27. Применение расчетных методов при определении очага пожара: учебно-методическое пособие / Тумановский А.А., Субботин А.А., Чешко И.Д. СПб.: ФГБОУ ВО «СПб университет ГПС МЧС России», 2019. – 84 с.
28. Схема работы в программе PyroSim. URL: https://www.pyrosim.ru/download/Pyrosim_work.pdf (дата обращения: 02.02.2024).
29. Видео-урок 3.6. – Пример моделирования процессов газового и водяного пожаротушения в программе PyroSim. // youtube.com. Google LLC. 2024 URL: <https://www.youtube.com/watch?v=fhpa7ZiYBA> (дата обращения: 02.02.2024).
30. СП 12.13130.2009. Свод правил. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.
31. Приказ МЧС РФ от 10 июля 2009 г. № 404 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах».
32. Пособие по определению расчетных величин пожарного риска для производственных объектов. М.: ВНИИПО, 2012. – 242 с.
33. Проект Приказа МЧС РФ «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах».
34. СП 90.13330.2012 Свод правил. Электростанции тепловые. Актуализированная редакция СНиП II-58-75.
35. 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.
36. ГОСТ 3022-80. Водород технический. Технические условия.
37. СП 60.13330.2020. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха (п.7.7, 9).
38. СП 7.13130.2013 Отопление, вентиляция и кондиционирование. Требования пожарной безопасности (с изменениями от 2020 г.).
39. Аминов Р.З., Бурденкова Е.Ю., Портянкин А.В. Методика оценки годового риска от поломок, пожаров и взрывов на основе графов состояний в электролизных цехах. Надежность и безопасность энергетики. 2018. – Т. 11, № 4. – С. 305-310.
40. Аминов Р.З. Анализ компоновочных решений электролизного цеха водородной надстройки с учетом надежности и взрывопожароопасности / Р.З. Аминов, А.В. Портянкин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2018. – Т. 20. – № 5-6. – С. 29-36.
41. ГОСТ Р 54142-2010 Менеджмент рисков. Руководство по применению организационных мер безопасности и оценки рисков. Методология построения универсального дерева событий.
42. ГОСТ Р 12.3.047-2012 Система стандартов безопасности труда. пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля.
43. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 28 ноября 2022 г. № 415 «Об утверждении Руководства по безопасности «Методика оценки последствий аварий на взрывопожароопасных химических производствах».
44. 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.
45. Кутузова К.С. Численное моделирование утечки водорода в вентилируемом помещении. Атомная энергия,

[S.l.]. – V. 134. – N. 5-6. – P. 270-273, янв. 2024. ISSN 0004-7163. Доступно на: <<https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/5310>>. Дата доступа: 29 фев. 2024.

46. Кутузова К.С. Экспериментальное исследование истечения и воспламенения водорода в вентилируемом помещении. Атомная энергия, [S.l.]. – V. 134. – N. 5-6. – P. 273-278, янв. 2024. ISSN 0004-7163. Доступно на: <<https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/5311>>. Дата доступа: 29 фев. 2024.

47. Численное моделирование утечки водорода в ограниченное помещение с вентиляционными отверстиями / К.С. Кутузова, Е.М. Щенникова, Ю.А. Томилов [и др.] // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2022 по направлению «Инновационные ядерные технологии»: Сборник научных трудов всероссийской научно-практической конференции, Снежинск, 23-24 марта 2022 года. – Снежинск: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2022. – С. 90-92.

Статья поступила в редакцию 02.02.2024

Статья принята к публикации 15.03.2024

УДК 504.06

EDN: SXCCAZ

**ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВ СНИЖЕНИЯ НЕГАТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ
СРЕДУ ПРИ ПЕРЕХОДЕ НА НАИЛУЧШИЕ ДОСТУПНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

© Автор(ы) 2024

SPIN: 9205-9338

AuthorID: 846394

ORCID: ORCID 0000-0002-5462-3612

ResearcherID: T-6602-2017

ScopusID: 56871202000

КОНДРАТЬЕВА Ольга Евгеньевна, доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Инженерной экологии и охраны труда» Института электротехники и электрофикации
Национальный исследовательский университет «МЭИ»
(111250, Россия, Москва, улица Красноказарменная, 14, e-mail: KondratjevaOE@mpei.ru)

SPIN: 2883-3017

AuthorID: 975812

ORCID: 0000-0002-4669-8729

ResearcherID: AAZ-8369-2020

ScopusID: 57195741989

ЛОКТИОНОВ Олег Александрович, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Инженерной экологии и охраны труда» Института электротехники и электрофикации
Национальный исследовательский университет «МЭИ»
(111250, Россия, Москва, улица Красноказарменная, 14, e-mail: LjktionovOA@mpei.ru)

SPIN: 6250-0629

AuthorID: 904137

ORCID: 0000-0001-5414-725X

ResearcherID: AAB-9442-2022

ScopusID: 56871119000

БОРОВКОВА Анастасия Михайловна, кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Инженерной экологии и охраны труда» Института электротехники и электрофикации
Национальный исследовательский университет «МЭИ»
(111250, Россия, Москва, улица Красноказарменная, 14, e-mail: BorovkovaAM@mpei.ru)

SPIN: 5430-8935

AuthorID: 1121305

ORCID: 0000-0003-0213-8313

ResearcherID: JWO-7870-2024

ScopusID: 57208881657

ЗВОНКОВА Наталья Владимировна, аспирант, старший преподаватель кафедры «Инженерной экологии и
охраны труда» Института электротехники и электрофикации
Национальный исследовательский университет «МЭИ»
(111250, Россия, Москва, улица Красноказарменная, 14, e-mail: ZvonkovaNV@mpei.ru)

Аннотация. Москва – один из крупнейших мировых мегаполисов с высокой плотностью населения, что определяет необходимость постоянного совершенствования системы обеспечения качества окружающей среды и, соответственно, сохранения здоровья людей. Внедрение наилучших доступных технологий (НДТ) на предприятиях города Москвы позволит получить социальный и экономический эффект от прогнозируемого снижения заболеваемости. Цель исследования – сформировать карты территориального распределения выбросов промышленных предприятий, выявить наиболее загрязненные административные округа города Москвы с учетом плотности проживающего населения и количества выбросов; провести прогнозную оценку экономического эффекта при внедрении НДТ за счет снижения предотвращенного экологического ущерба от валовых выбросов предприятий города Москвы. Источником данных по выбросам предприятий является государственный реестр объектов негативного воздействия на окружающую среду Федеральной службы по надзору в сфере природопользования. Расчет индекса неканцерогенной опасности проводился согласно документу «Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду» (Р 2.1.10.1920-04). В ходе работы установлено, что основной экономический ущерб от загрязнения атмосферного воздуха наносят выбросы оксидов азота и диоксида серы, наиболее загрязненными административными округами города Москвы являются ЮВАО, САО и ЮАО. Наибольший годовой экологический ущерб от загрязнения атмосферного воздуха маркерными веществами при неисполнении требований природоохранного законодательства по внедрению НДТ будет достигнут в таких отраслях как: энергетика – 1,1 млрд рублей

и обрабатывающие производства – 460 млн рублей. Суммарный экологический годовой ущерб от выбросов маркерных загрязняющих веществ предприятиями I, II категории составляет 795 млн рублей в год. Переход предприятий города Москвы на наилучшие доступные технологии позволит получить не только снижение валовых выбросов, но и заметный социальный эффект, так как позволит снизить заболеваемость органов дыхания и сердечно-сосудистой системы города Москвы.

Ключевые слова: наилучшие доступные технологии, индекс неканцерогенной опасности, экологический ущерб, снижение заболеваемости, промышленные предприятия, окружающая среда.

ASSESSMENT OF THE PROSPECTS FOR REDUCING THE NEGATIVE IMPACT ON THE ENVIRONMENT WHEN SWITCHING TO THE BEST AVAILABLE TECHNOLOGIES OF INDUSTRIAL ENTERPRISES

© The Author(s) 2024

KONDRATEVA Ol'ga Evgen'evna, doctor of technical sciences, associate professor, head of the Department of Environmental Engineering and Labor Protection of the Institute of Electrical Engineering and Electrification
National Research University "MPEI"

(111250, Russia, Moscow, Krasnokazarmennaya street, 14 E-mail: KondratyevaOYe@mpei.ru)

LOKTIONOV Oleg Aleksandrovich, candidate of technical sciences,
associate professor of the Department of Environmental Engineering and Labor Protection
of the Institute of Electrical Engineering and Electrification
National Research University "MPEI"

(111250, Russia, Moscow, Krasnokazarmennaya street, 14 E-mail: LoktionovOA@mpei.ru)

BOROVKOVA Anastasiya Mikhaylovna, candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the Department of Environmental Engineering and Labor Protection
of the Institute of Electrical Engineering and Electrification
National Research University "MPEI"

(111250, Russia, Moscow, Krasnokazarmennaya street, 14 E-mail: BorovkovaAM@mpei.ru)

ZVONKOVA Natal'ya Vladimirovna, graduate student, senior lecturer at the Department of Environmental Engineering and Occupational Safety at the Institute of Electrical Engineering and Electrification
National Research University "MPEI"

(111250, Russia, Moscow, Krasnokazarmennaya street, 14 E-mail: ZvonkovaNV@mpei.ru)

Abstract. Moscow is one of the world's largest megapolis with a high population density, which determines the need for continuous improvement of the system for ensuring the quality of the environment and, accordingly, preserving the health of people. The introduction of the best available technologies (BAT) at the enterprises of the city of Moscow will make it possible to obtain a social and economic effect from the projected decrease in morbidity. The aim of the study - is to form maps of the territorial distribution of emissions from industrial enterprises, to identify the most polluted administrative districts of the city of Moscow, taking into account the density of the living population and the amount of emissions; to make a forecast assessment of the economic effect of reducing gross emissions and reducing the incidence of diseases in the population of the city of Moscow. The source of data on emissions from enterprises is the state register of facilities that have a negative impact on the environment of the Federal Service for Supervision of Natural Resources. The calculation of the non-carcinogenic hazard index was carried out in accordance with the document "Guidelines for assessing the risk to public health from exposure to chemicals that pollute the environment" (R 2.1.10.1920-04). In the course of the work, it was found that the main economic damage from atmospheric air pollution is caused by emissions of nitrogen oxides and sulfur dioxide; the most polluted administrative districts of Moscow are the Southern Administrative District, the CAO and the Southern Administrative District. The greatest annual environmental damage from atmospheric air pollution by marker substances in case of non-compliance with the requirements of environmental legislation on the introduction of BAT will be achieved in such industries as: energy – 1.1 billion rubles and manufacturing - 460 million rubles. The total annual environmental damage from emissions of marker pollutants by enterprises of the I, II categories amounts to 795 million rubles per year. The Moscow enterprises transition of the I and II categories negative impact to the best available technologies will allow to receive not only reduction of gross emissions, but also will provoke noticeable social effect as will allow to reduce morbidity of respiratory organs and cardiovascular system of Moscow population.

Keywords: best available technologies, non-carcinogenic hazard index, environmental damage, reducing morbidity, industrial enterprises, environment.

Для цитирования: Кондратьева О.Е. Оценка перспектив снижения негативного воздействия на окружающую среду при переходе на наилучшие доступные технологии промышленных предприятий / О.Е. Кондратьева, О.А. Локтионов, А.М. Боровкова, Н.В.Звонкова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 1(65). – С. 188-197. – EDN: SXCCAZ.

Введение. Внедрение безопасных для окружающей среды и ресурсосберегающих технологий, эффективное и рациональное использования материальных, финансовых и природных ресурсов, является основной задачей российской промышленной политики согласно Федеральному закону от 31.12.2014 г. № 488-ФЗ [1]. При этом, очевидно, важно поддерживать разумный баланс между экологической устойчивостью производственных процессов, финансовыми ресурсами предприятия и общим социально-экономическим контекстом в стране. Так, в Основах государственной политики в области экологического развития Российской Федерации [2] в качестве стратегической цели для нашей страны обозначено решение социально-экономических задач, обеспечивающих экологически ориентированный рост экономики и сохранение благоприятной окружающей среды.

В настоящее время одним из основных средств для реализации этих стратегических задач служит адаптация российской промышленности к стандартам наилучших доступных технологий (НДТ), что регламентируется Федеральным законом от 21.07.2014 г. № 219-ФЗ [3]. Необходимо отметить, что величина эффектов, которые могут быть получены при внедрении НДТ, зависит от многих составляющих, в том числе таких, как объем промышленного производства в каждом регионе и технологический уровень производственных фондов на момент внедрения [4]. В данной статье приведена попытка оценки эффективности НДТ на примере города Москвы.

Существует достаточно много исследований, согласно которым основным источником вредных веществ в атмосфере мегаполисов является автомобильно-дорожный комплекс. В соответствии с различными исследованиями, доля выбросов от автотранспорта в общем объеме атмосферного загрязнения колеблется между 50-80%, в то время как другие источники указывают на долю от 30 до 70% [5]. В среднем можно считать, что примерно 40-75% всех загрязнений атмосферы в крупных городах приходится на долю автотранспортных средств [6]. Очевидно, что источником остальных выбросов является промышленный сектор мегаполисов и, учитывая высокую численность населения таких городов, снижение выбросов промышленности может повлечь за собой значительный социально-экономический эффект [7, 8]. Москва –мировой мегаполис с высокой плотностью населения, поэтому здесь особенно необходим контроль качества окружающей среды и постоянное улучшение системы обеспечения требуемого качества так, как это способствует сохранению здоровья множества людей. Учитывая, что промышленный сектор Москвы состоит из предприятий, вносящих различный вклад в общее загрязнение атмосферы, актуальным становится поиск такого подхода при внедрении новых технологий, который обеспечил бы желаемый

баланс экологических, экономических и социальных аспектов и позволил провести количественную оценку эффективности внедрения НДТ.

В соответствии с Федеральным законом от 10.01.2002 г. № 7-ФЗ [9] объектами обязательного перехода на НДТ являются предприятия, отнесенные к I категории негативного воздействия на окружающую среду (НВОС). Предприятия II категории также могут осуществить переход на добровольной основе. Таким образом, именно предприятия I и II категории представляют наибольший интерес для оценки возможности снижения негативного воздействия на окружающую среду при переходе на НДТ. Как показано на рисунке 1, именно на эти категории предприятий приходится 85% – 119,9 тыс. т от объема выбросов стационарных источников города Москвы, то есть порядка 25% от общего объема выбросов всех источников (стационарных и автотранспорта). Кроме того, анализируя данные государственного реестра объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду [10] Росприроднадзора (далее реестр НВОС) за 2021 год можно выявить, что основной вклад в выбросы города Москвы вносят промышленные предприятия следующих таких видов экономической деятельности, как: обеспечение электроэнергией, газом и паром; кондиционирование воздуха (88626 т/год – 63%), обрабатывающие производства (34478 т/год – 24%), водоснабжение, водоотведение, сбор и утилизация отходов (5645 т/год – 4%). Анализ данного распределения выбросов также позволяет сократить перечень предприятий, с которых целесообразно начать внедрение новейших технологий.

При проведении комплексной научной работы НИУ «МЭИ» и Департамента природопользования и охраны окружающей среды города Москвы, включающей анкетирование и аудит предприятий, по определению потенциала снижения НВОС в городе Москве были разработаны три сценария внедрения природоохранного оборудования на предприятиях I и II категории. Данные сценарии, позволят достигнуть снижения выбросов маркерных загрязняющих веществ, для которых разрабатываются технологические нормативы, на 5-10%, 15-25% и 30-40%.

В первом сценарии предполагается переход на НДТ всех предприятий I категории НВОС г. Москвы, а предприятия II категории осуществляют модернизацию только в рамках текущей природоохранной деятельности. Второй сценарий реализуется при переходе на НДТ предприятий I категории, а также самых значимых загрязнителей II категории НВОС, а также предусматривает внедрение на предприятиях I категории не только НДТ, но и наилучших экологических мировых практик (НЭМП). По третьему сценарию осуществляется внедрение и НДТ и наилучших экологических мировых практик на всех предприятиях I и II категории.



Рисунок 1 – Структура валовых выбросов загрязняющих веществ объектами I-IV категории НВОС города Москвы по видам экономической деятельности за 2021 год, тонн/год

В результате оценки резервов по снижению негативного воздействия наиболее предпочтительным сценарием является сценарий с прогнозируемым снижением выбросов маркерных загрязняющих веществ на уровне 15-25% (второй из рассматриваемых сценариев).

Методология. Данные о валовых выбросах стационарных источников загрязнения атмосферного воздуха были получены из реестра НВОС [10] Росприроднадзора. В рамках исследования было принято, что внедрение НДТ на предприятиях I и II категории НВОС обеспечит снижение выбросов маркерных загрязняющих веществ от стационарных источников с учетом выбранного сценария на 15-25%. При этом рассматривались предприятия указанных категорий, которые вносят 95% вклада в загрязнение атмосферного воздуха города Москвы. В перечень таких объектов попали 62 предприятия I категории и 209 предприятия II категории НВОС.

На основании анализа Докладов ВОЗ о состоянии здравоохранения в мире [11, 12] установлено, что основными видами заболеваемости и смертности с точки зрения влияния экологических факторов и факторов окружающей среды на здоровье населения являются заболевания органов дыхания, сердечно-сосудистой системы и новообразования. В качестве осредненного коэффициента, учитывающего влияние данных факторов на здоровье населения, можно принять значение, равное 20%, которое соответствует докладом ВОЗ [13].

Экономическая оценка ущерба выполнена согласно Временной методики определения предотвращенного экологического ущерба [14]. Величина предотвращенного экологического ущерба от загрязнения атмосферного воздуха стационарными источниками выбросов оценена на основе показателей

удельного ущерба, представляющих собой удельные стоимостные оценки ущерба от выброса единицы (1 условной тонны) приведенной массы загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферный воздух по формуле:

$$U_{pr}^{atm} = \gamma^{atm} * J_{def} * K_s^{atm} * \sum_{i=1}^n A_i^{atm} * \Delta m_i^{atm} \quad (1)$$

где U_{pr}^{atm} – предотвращенный экологический ущерб от загрязнения атмосферного воздуха выбросами от стационарных источников, тыс. руб., γ^{atm} – удельная величина экономической оценки ущерба, численное значение которого задается в разрезе экономических районов, усл.т/т; J_{def} – индекс-дефлятор; K_s^{atm} – коэффициент экологической ситуации и экологической значимости состояния атмосферного воздуха территорий в составе экономических районов России, Δm_i^{atm} – сокращение массы годового выброса вида i загрязнения в атмосферу за счет экологически значимых мероприятий, т/год; A_i^{atm} – показатель относительной опасности загрязнения атмосферного воздуха вида i -го загрязняющего вещества, n – общее число видов загрязнения, выбрасываемых источником в атмосферу.

Расчет индексов сравнительной неканцерогенной опасности для каждого округа города Москвы от выбросов, как маркерных, так и всех загрязняющих веществ рассматриваемыми предприятиями проведен согласно Руководству Р 2.1.10.1920-04 [15] и Методическим рекомендациям МР 5.1.0081-13 [16] по формуле:

$$HRI = PDV_i \cdot TW \cdot \frac{P}{10^4} \quad (2)$$

где HRI – индекс сравнительной неканцерогенной опасности; PDV_i – величина выброса загрязняющего вещества (т/год); TW – весовой коэффициент влияния

на здоровье; P – численность населения.

Оценка численности и плотности населения административных округов города Москвы проведена на основании сведений единого хранилища данных ИАС МКР [17].

Сведения об общей заболеваемости населения города Москвы взяты из ежегодных государственных докладов о состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения [18] и докладов ФГБУ «ЦНИИ организации и информатизации здравоохранения» [19].

Прогнозные значения снижения заболеваемости различных систем населения города Москвы для сценария снижения выбросов маркерных веществ на 15-25% при внедрении НДТ и НЭМП на объектах I и II категории оценены с помощью разработанной авторами зависимости:

$$\Delta Z_i = Z_i \cdot \frac{HRI_i - HRI_{marker_i}}{HRI_i} \cdot \rho_{Z_i, HRI_i} \cdot w_{os} \quad (3)$$

где Z_i – общая заболеваемость дыхательной системы, случаев; HRI_{marker_i} – индекс сравнительной неканцерогенной опасности от выбросов маркерных веществ; HRI_i – индекс сравнительной неканцерогенной опасности; ρ_{Z_i, HRI_i} – коэффициент ранговой корреляции Спирмена между заболеваемостью и индексом сравнительной не-

канцерогенной опасности; w_{os} – коэффициент, учитывающий влияние факторов окружающей среды на состояние здоровья населения ($w_{os} = 0,2$) [11-13].

Результаты. На основании сведений о плотности населения [17] и данных о суммарных выбросах загрязняющих веществ [10] рассчитан удельный показатель, как произведение выбросов и плотности населения для соответствующего административного округа города Москвы, и визуализирован на карте – рисунок 2.

Для оценки экономической эффективности мероприятий по защите окружающей среды возможно использовать величину экологического ущерба от загрязнением окружающей среды [20], что позволит согласовать интересы как производства, так и социальные и экологические интересы [21]. В рамках исследований НИУ «МЭИ» и Департамента природопользования и охраны окружающей среды города Москвы, для районов города Москвы, проведена оценка экологического ущерба и также прогнозные снижение экономического ущерба при внедрении НДТ по сценарию №2, в соответствии с которым снижение выбросов маркерных веществ осуществляется на 15-25%. Распределение рассчитанного экономического ущерба по районам города Москвы представлено на рисунке 3.

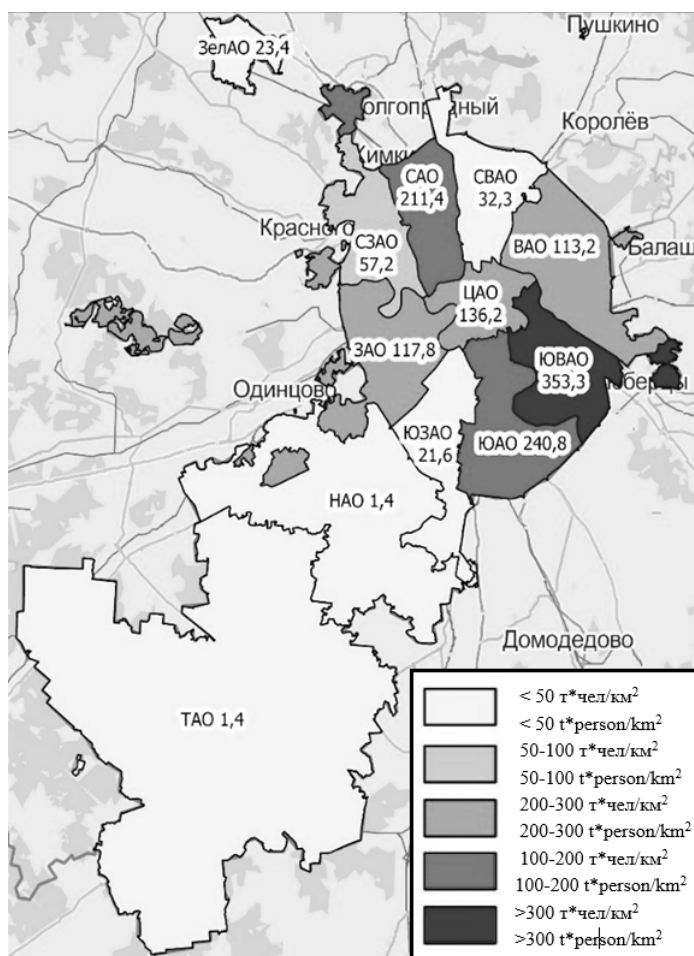


Рисунок 2 – Распределение удельного показателя произведения суммарных выбросов загрязняющих веществ на плотность населения административных округов города Москвы, $t \cdot \text{чел} / \text{км}^2$

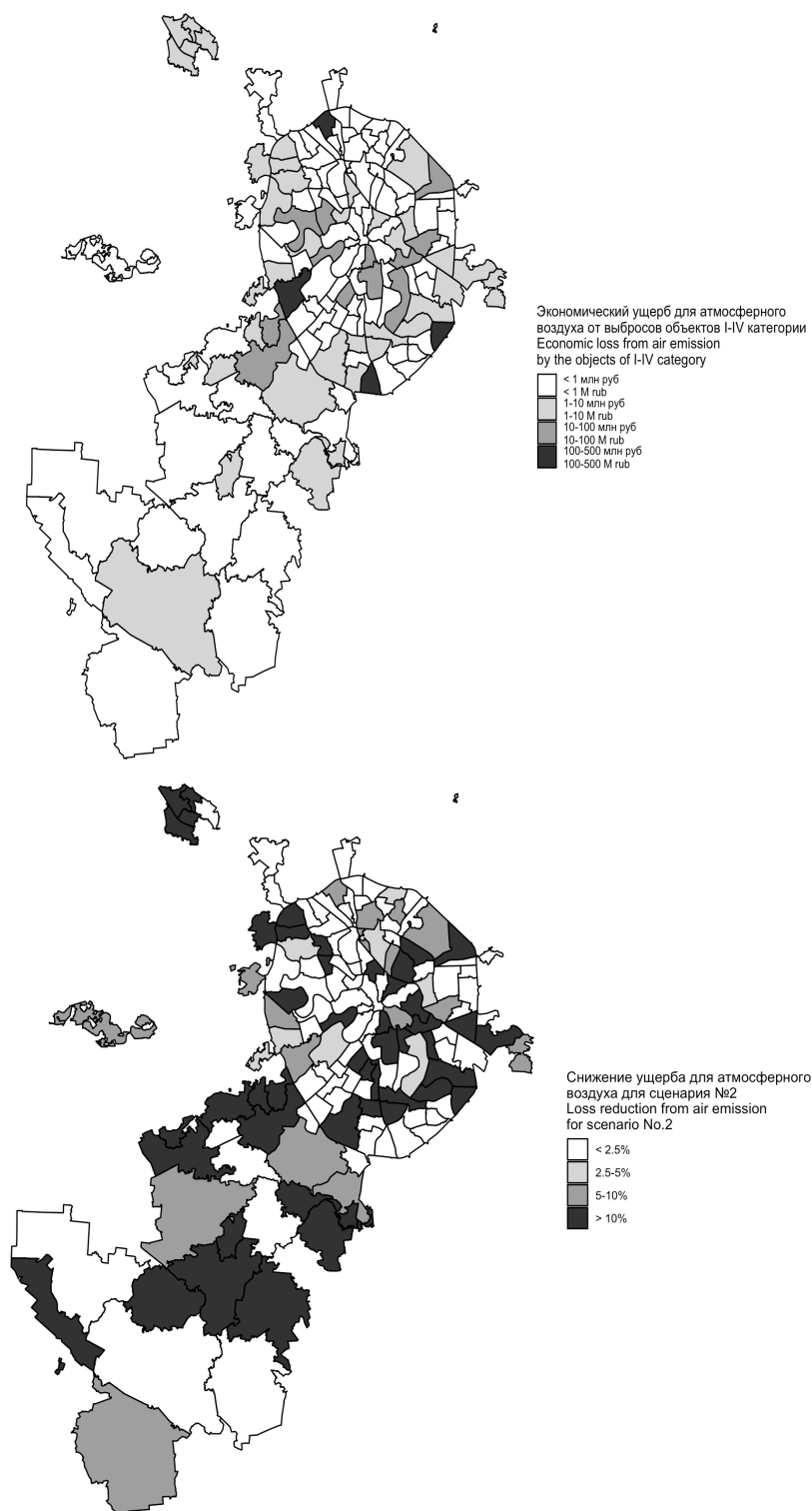


Рисунок 3 – Распределение экономического ущерба по районам города Москвы

Распределение экологического ущерба от выброса всех загрязняющих веществ объектами I-IV категории НВОС города Москвы, а также маркерных загрязняющих веществ предприятиями I категории и II категории по виду экономической деятельности визуализировано на рисунке 4.

В результате анализа покомпонентного состава выбросов загрязняющих веществ от предприятий I-IV категории НВОС, перечня маркерных веществ

из соответствующих информационно-технических справочников наилучших доступных технологий, а также с учетом веществ, входящих в индекс загрязнения атмосферы, согласно Рекомендациям ВОЗ [22], установлено, что наибольшие перспективы снижения выбросов существуют для таких веществ как: оксиды азота (NO_x), диоксид серы (SO_2), оксид углерода (CO), смесь предельных углеводородов ($C_{10}H_{14}$ - $C_{10}H_{22}$).



Рисунок 4 – Распределение экологического ущерба от выбросов всех загрязняющих веществ предприятиями I-IV категории НВОС города Москвы (в т.ч. маркерных веществ от объектов I и II категории НВОС) по видам экономической деятельности в ценах 2021 года

В таблице 1 отражены количественные данные по выбросам рассматриваемых загрязняющих веществ за год с указанием доли маркерных веществ по категориям НВОС и значения, соответствующего экологического ущерба.

Для сравнительной оценки уровней выбросов маркерных загрязняющих веществ и индексов неканцерогенной опасности в разрезе различных территорий проведено отнесение всех объектов I и II категории к соответствующим 11 административным округам города Москвы, в соответствии с их местоположением. Для оценки перспектив изменения социальных показателей при переходе предприятий на НДТ в рамках исследования проведен расчет индекса

неканцерогенной опасности от выбросов маркерных загрязняющих веществ объектами I и II категории НВОС для органов дыхания, крови и сердечно-сосудистой системы человека для всех округов города Москвы, результаты которого представлены в таблице 2.

Значения потенциального снижения индексов неканцерогенной опасности ΔHRI_i дыхательной и сердечно-сосудистой системы и крови $\Delta \Delta_i$ в рамках административных округов города Москвы при внедрении НДТ и НЭМП на объектах I и II категории НВОС для предлагаемого сценария внедрения НДТ и снижения выбросов маркерных ЗВ на 15-25% приведены на рисунке 5.

Таблица 1 – Значения выбросов ключевых загрязняющих веществ и экологического ущерба от предприятий города Москвы за год в ценах 2021 года

Загрязняющее вещество	Выбросы загрязняющих веществ, т/год			Экологический ущерб, млн рублей		
	I-IV категория	Маркерные вещества		I-IV категория	Маркерные вещества	
		I категория	II категория		I категория	II категория
NO _x	60 196	37 866 (62,9%)	14 895 (24,7%)	760,7	478,4	187,9
SO ₂	34 424	9 287 (27,0%)	15 (0,04%)	528,0	142,5	0,2
CO	21 569	7807 (36,2%)	8205 (38,0%)	6,6	2,4	2,5
Смесь предельных углеводородов (C ₁ H ₄ -C ₅ H ₁₂ , C ₆ H ₁₄ -C ₁₀ H ₂₂)	11 579	7679 (66,3%)	0,1	8,0	5,3	-
Остальные немаркерные	18 527	-	-	460,9	-	-

Таблица 2 – Распределение значений индексов неканцерогенной опасности для различных типов заболеваний населения города Москвы в разрезе административных округов

	Индексы неканцерогенной опасности HRI, * 1 млн							
	Органы дыхания						Сердечно-сосудистая система и кровь	
	Все вещества			Маркерные вещества				
	Дети (до 14 лет)	Подростки (15-17 лет)	Взрослые (18 лет и более)	Дети	Подростки	Взрослые	Все вещества	Маркерные вещества
ЦАО	220	61	1 239	189	52	1 062	1 082	1 060
САО	14 926	4 117	83 893	1 258	347	7 069	19 990	7 128
СВАО	333	92	1 871	21	6	120	1 447	126
ВАО	3 928	1 084	22 081	1 083	299	6 086	8 808	5 867
ЮВАО	3 722	1 027	20 918	2 497	689	14 033	15 397	3 105
ЮАО	10 563	2 914	59 370	2 193	605	12 326	17 457	12 218
ЮЗАО	2 814	776	15 815	857	237	4 819	5 893	4 840
ЗАО	14 216	3 922	79 901	2 787	769	15 664	30 248	15 728
СЗАО	874	241	4 910	529	146	2 971	3 539	2 991
ЗелАО	54	15	304	45	12	254	276	260
ТиНАО	242	67	1 362	109	30	611	816	603

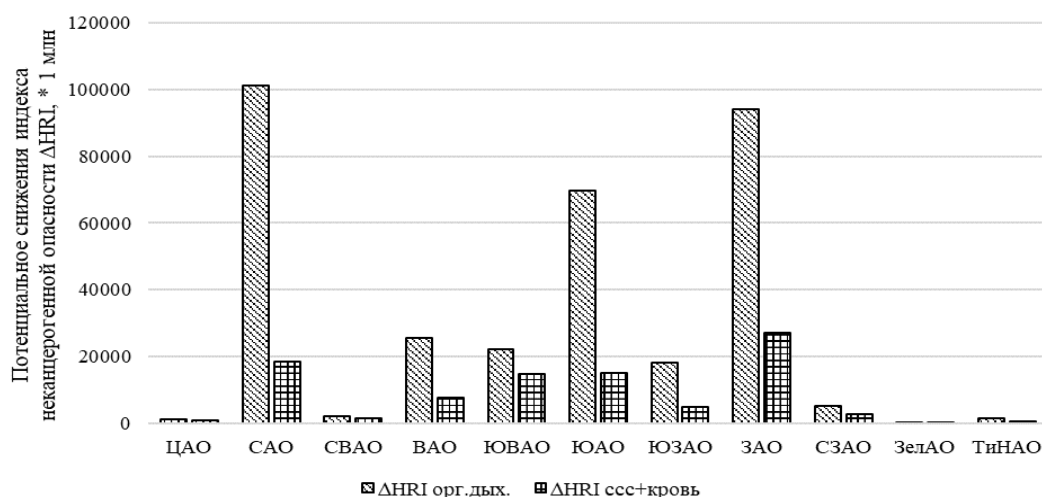


Рисунок 5 – Значения потенциального снижения индексов неканцерогенной опасности дыхательной и сердечно-сосудистой системы и крови в рамках административных округов города Москвы

Обсуждение. Наиболее загрязненными административными округами города Москвы с учетом плотности проживающего населения и количества выбросов загрязняющих веществ являются ЮВАО, САО и ЮАО. Основной объем выбросов загрязняющих веществ в указанных округах города Москвы приходится на объекты I категории данных округов, что составляет 85% выбросов от всех объектов I категории или 44% выбросов от всех предприятий города Москвы. Установлено, что наибольший ущерб от загрязнения атмосферного воздуха при неисполнении требований природоохранного законодательства по внедрению наилучших доступных технологий может быть зафиксирован от воздействия таких отраслей как: обеспечение электроэнергией, газом и паром; кондиционирование воздуха – 1,1 млрд рублей (доля маркерных – 53%), обрабатывающие производства – 460 млн рублей (доля маркерных – 39%). Непосредственно, от выбросов маркерных веществ суммарный экологический годовой ущерб от всех предприятий I

категории и предприятий II категории НВОС, которые вносят 95% вклада в загрязнение атмосферного воздуха города Москвы составляет 795 млн. рублей в год. По результатам оценки и анализа суммарных валовых выбросов и экологического ущерба определены маркерные загрязняющие вещества, на снижение которых должно быть направлено основное внимание при выборе НДТ и НЭМП на предприятиях города Москвы, а именно: оксиды азота, диоксид серы, которые совокупно вносят вклад 43% в суммарный выброс (62 тыс т в год) и 46% в общий суммарный экологический ущерб (0,8 млрд руб в год), выбрасываемых в атмосферный воздух. На основании сведений распределения индексов неканцерогенной опасности для органов дыхания, сердечно-сосудистой системы и крови, установлено, что для них характерен практически одинаковый вклад в суммарный индекс неканцерогенной опасности в разрезе распределения по I и II категории, что дополнительно подтверждает необходимость внедрения природоохранных мероприятий

на объектах, отнесенных к рассматриваемым выше категориям. Наибольшие значения индексов неканцерогенной опасности для каждого из рассматриваемых заболеваний характерны для ЗАО, ЮАО, САО и ЮВАО города Москвы.

Рассмотрение сокращения воздействия тех предприятий Москвы, которые вносят 95% вклада в загрязнение атмосферного воздуха города, в перечень которых попали 62 предприятия I категории и 209 предприятия II категории НВОС, представляется целесообразным для соблюдения разумного баланса между финансовыми, административными и социальными сферами.

Выводы. Наибольший годовой экологический ущерб от загрязнения атмосферного воздуха маркерными веществами при неисполнении требований природоохранного законодательства по внедрению НДТ будет достигнут в таких отраслях как: энергетика – 1,1 млрд рублей и обрабатывающие производства – 460 млн рублей. Суммарный экологический годовой ущерб от выбросов маркерных загрязняющих веществ предприятиями I, II категории составляет 795 млн рублей в год. Расчет индекса неканцерогенной опасности для всех округов города Москвы показывает, что для органов дыхания и сердечно-сосудистой системы характерен практически одинаковый вклад таких веществ как оксиды азота и диоксид серы в суммарный индекс неканцерогенной опасности в разрезе распределения по I и II категории, что дополнительно подтверждает необходимость внедрения природоохранных мероприятий на объектах, отнесенных к данным категориям. Наибольшие значения индексов неканцерогенной опасности для каждого из рассматриваемых заболеваний характерны для ЗАО, ЮАО, САО и ЮВАО города Москвы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Российская Федерация. Законы. О промышленной политике в Российской Федерации: Федер. закон № 488-ФЗ: принят Государственной Думой 16 декабря 2014 г.: одобрен Советом Федерации 25 декабря 2014 г.: послед. ред. // КонсультантПлюс: сайт. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_173119/ (дата обращения: 25.12.2023). Режим доступа: некоммерч. интернет-версия.
2. Российская Федерация. Основы государственной политики в области экологического развития Российской Федерации на период до 2030 года: утв. Президентом РФ 30 апреля 2012 г. // КонсультантПлюс: сайт. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_129117/ (дата обращения: 25.12.2023). Режим доступа: некоммерч. интернет-версия.
3. Федеральный закон РФ от 21.07.2014 № 219-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об охране окружающей среды» и отдельные законодательные акты Российской Федерации» // Собрание законодательства РФ – № 30 – 2014.
4. Бурматова О.П. Возможности внедрения принципа НДТ в российскую практику экологической политики // Мир экономики и управления: электрон. журнал 2018. – №18(3). – С. 29–41. – ISSN 2658-5375 (online). URL: <https://woeam.elpub.ru/jour/article/view/32/32> (дата обращения 20.02.2024).
5. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2019 году: государственный доклад // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации: сайт. URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/?PAGEN_2=2/. Дата публикации 30.12.2020.
6. Пепина Л.А., Созонтова А.Н. Загрязнение атмосферного воздуха автомобильно-дорожным комплексом // AlfaBuild. – 2017. – № 1(1). – С. 99–110.
7. A hierarchical Bayesian model for the analysis of space-time air pollutant concentrations and an application to air pollution analysis in Northern China / W. Ding, Y. Leung, J. Zhang, T. Fung // Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. – 2021. – №35 (4). URL: <https://www.researchgate.net/publication/351403686> (дата обращения 20.02.2024).
8. Соловьева С.В., Фильченкова О.А., Медведева О.Е. Оценка ущерба (вреда) от загрязнения атмосферного воздуха для стимулирования внедрения наилучших доступных технологий в России // Имущественные отношения в Российской Федерации. – 2019. – № 9 (216). – С. 35–45.
9. Российская Федерация. Законы. Об охране окружающей среды: Федер. закон № 7-ФЗ: принят Государственной Думой 20 декабря 2001 г.: одобрен Советом Федерации 26 декабря 2001 г.: послед. ред. // КонсультантПлюс: сайт. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823/ (дата обращения: 25.12.2023). Режим доступа: некоммерч. интернет-версия.
10. Государственный реестр объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду // Федеральная служба по надзору в сфере природопользования сайт URL: https://uonvos.rpn.gov.ru/rpn/pto-uonvos/onv_registry?pcurrent_page=1&pper_page=20&plast_page=1&oinclusion_date=desc (дата обращения 25.12.2023).
11. Comparative quantification of health risks: global and regional burden of disease attributable to selected major risk factors // World Health Organization. 2004. URL: file:///Users/macbookpro/Downloads/9241580313_eng.pdf Publication date: 18.10.2004.
12. Preventing disease through healthy environments: a global assessment of the burden of disease from environmental risks // World Health Organization. 2016. URL: https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/204585/9789241565196_eng.pdf?sequence=1 Publication date: 14.03.2016.
13. Ревич Б.А., Авалиани С.Л., Тихонова Г.И. Основы оценки воздействия загрязненной окружающей среды на здоровье человека: пособие по региональной экологической политике. / Центр экологической политики России – М.: ЦЭПР: Акрополь, 2004. – 267 с.: электрон. версия печ. изд. URL: <https://ecfor.ru/wp-content/uploads/books/revich/00.pdf?ysclid=lszmxe4jyb88041602> (дата обращения 20.02.2004).
14. Временная методика определения предотвращенного экологического ущерба: утв. председателем Государственного комитета Российской Федерации по охране окружающей среды В.И.Даниловым-Данильяном 9 марта 1999 г. // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: сайт. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200035561?ysclid=lszhgqjppj569372646/> (дата обращения 23.02.2024).
15. Р 2.1.10.1920-04. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду: утв. первым зам. Министра здравоохранения РФ, Главным государственным санитарным врачом РФ Г.Г.Онищенко 5 марта 2004 г. // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: сайт. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200037399/> (дата обращения 23.02.2024).
16. МР 5.1.0081-13. Определение порогов массовой неинфекционной заболеваемости и их использование в планировании надзорных мероприятий: утв. врио руководителя Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, врио Главного государственного санитарного врача РФ А.Ю.Поповой 28 ноября 2013 г. // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: сайт. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200110932/> (дата обращения 23.02.2024).
17. Единое хранилище данных: информационно-аналитическая система мониторинга комплексного развития г. Москвы / Показатели муниципальных образований // Управление Федеральной службы гос. статистики по г. Москве и Московской области URL: [https://ehd.moscow/index.php?DIM_2622_1=3&id_src=361&id_ind=74&id_tab=1&action=show_details_open&show=inds&show_full=1&exist=1&source=9999&id_root\[0\]=361_361&id_root\[1\]=361_74/](https://ehd.moscow/index.php?DIM_2622_1=3&id_src=361&id_ind=74&id_tab=1&action=show_details_open&show=inds&show_full=1&exist=1&source=9999&id_root[0]=361_361&id_root[1]=361_74/) (дата

обращения 25.12.2023).

18. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2020 году: государственный доклад. // Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека: сайт. URL: https://www.rosпотrebnadzor.ru/documents/details.php?ELEMENT_ID=18266/. Дата публикации 05.07.2021.

19. Заболеваемость населения: медицинская статистика // ФГБУ «ЦНИИ» организации и информатизации здравоохранения Минздрава России: офиц. сайт. URL: <https://mednet.ru/napravleniya/medicinskaya-statistika/> (дата обращения 25.12. 2023). Режим доступа: для зарегистрир. пользователей.

20. Ушакова Е.О. Методика определения экономической эффективности затрат на природоохранные мероприятия // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2006. – № 6. – С. 185-190.

21. Потравный И.М., Новоселов А.Л., Новоселова И.Ю. Развитие методов экономической оценки ущерба от загрязнения окружающей среды и их практическое применение // Экономическая наука современной России: элек. журнал. – 2018. – № 3(82). – С. 35-48. – ISSN 2618-8996 (Online). URL: <https://www.ecr-journal.ru/jour/article/view/290/252> (дата обращения 20.02.2024).

22. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide // World Health Organization. [2021]. URL: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/345329/9789240034228-eng.pdf?sequence=1> Publication date: 22.09.2021.

Статья поступила в редакцию 23.01.2024

Статья принята к публикации 15.03.2024

УДК: 628.515

EDN: ULEJZG

НЕПРЕРЫВНЫЙ КОНТРОЛЬ НЕФТЕПРОДУКТОВ В СТОКАХ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ТЭЦ

© Автор(ы) 2024

SPIN: 5092-6494

AuthorID: 131728

ORCID: 0000-0002-3054-1786

ResearcherID: A-5719-2014

ScopusID: 6508255564

БАДЕНКО Владимир Львович, доктор технических наук,

профессор высшей школы гидротехнического и энергетического строительства

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

(195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, e-mail: badenko_vl@spbstu.ru)

SPIN: 3014-8601

AuthorID: 99645

ORCID: 0000-0002-6056-6618

ScopusID: 6603631466

МОЛОДКИНА Людмила Михайловна, доктор технических наук,

профессор высшей школы гидротехнического и энергетического строительства

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

(195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, e-mail: asminaster7@gmail.com)

SPIN: 2051-7248

AuthorID: 921525

ORCID: 0000-0002-6486-6589

ScopusID: 57189361029

ТАРАСЕВСКИЙ Филипп Георгиевич, аспирант

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

(195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, e-mail: TFilG@yandex.ru)

Аннотация. В статье раскрыта актуальность организации системы непрерывного контроля степени загрязнения нефтепродуктами вод системы охлаждения прямоточного типа, применяемых на ТЭС. Прямоточные системы охлаждения используют в качестве источника воды природные объекты (реки, озёра). Ввиду наличия в составе контура охлаждения маслоохладителей, имеется риск поступления нефтепродуктов в водные объекты. В работе рассматривается ТЭЦ-17 «Выборгская» в городе Санкт-Петербург, имеющая прямоточную систему охлаждения и использующую объект рыбохозяйственного назначения I категории – р. Нева, в качестве источника водоснабжения и водосброса. В рамках настоящей работы представлены результаты оцифровки данных пробоотбора в стоках системы охлаждения рассматриваемой ТЭС на предмет массовой концентрации нефтепродуктов. Проанализированы источники и причины попадания нефтепродуктов в стоки системы охлаждения рассматриваемого объекта. Приведены нормативные документы, регламентирующие проведение регулярного контроля стоков на предмет наличия нефтепродуктов. Предложена структура организации системы непрерывного контроля концентрации растворенных нефтепродуктов и нефтяных пленок в стоках системы охлаждения, раскрыта логика построения и работы данной системы. Осуществлен подбор основного и вспомогательного оборудования. Приведены и проанализированы факторы, искажающие проведение поточного измерения массовой концентрации нефтепродуктов путем пересчёта концентрации косвенного параметра на концентрацию подконтрольного нефтепродукта. Представлен разработанный уникальный алгоритм, позволяющий осуществлять поточное измерение концентрации нефтепродуктов без применения реагентов. Представлены результаты сверки работы системы с результатами аккредитованной химической лаборатории.

Ключевые слова: контроль нефтепродуктов, экологический мониторинг, ПАУ, полициклические ароматические углеводороды, ТЭС, проточная система охлаждения.

CONTINUOUS CONTROL OF OIL PRODUCTS IN THE EFFLUENTS OF THE COOLING SYSTEM OF THERMAL POWER PLANTS

© The Author(s) 2024

BADENKO Vladimir Lvovich, doctor of technical sciences,

professor of the Higher School of Hydraulic and Power Engineering

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

(195251, Russia, St. Petersburg, Polytechnicheskaya St., 29, e-mail: badenko_vl@spbstu.ru)

MOLODKINA Lyudmila Mikhailovna, doctor of technical sciences,

professor of the Higher School of Hydraulic and Power Engineering

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

(195251, Russia, St. Petersburg, Polytechnicheskaya St., 29, e-mail: asminaster7@gmail.com)

TARASEVSKIY Philip Georgievich, postgraduate student

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

(195251, Russia, St. Petersburg, 29, Polytechnicheskaya St., e-mail: TFilG@yandex.ru)

Abstract. The article reveals the relevance of organizing a system of continuous control of oil products in the waters of the cooling system of the thermal power plant. The article considers TPP with a direct-flow cooling system. Direct-flow cooling systems use natural objects (rivers, lakes) as a source of water. Due to the presence of oil coolers in the cooling circuit, there is a risk of oil products entering water bodies. The paper considers CHP-17 "Vyborgskaya" in St. Petersburg, which has a direct-flow cooling system and uses a fishery object of first category – the Neva River as a source of water supply and spillway. Within the framework of the present work the results of digitization of sampling data in the effluents of the cooling system of the considered CHP for the mass concentration of oil products are presented. The sources and causes of oil products ingress into the cooling system effluents of the considered object are analyzed. Regulatory documents regulating regular control of effluents for the presence of petroleum products are given. The structure of organization of the system of continuous control of dissolved oil products and oil films concentration in cooling system effluents is proposed. The logic of construction and work of the created system is revealed. Selection of the main and auxiliary equipment is carried out. Factors distorting in-line measurement of oil products mass concentration by means of. The developed unique algorithm allowing to carry out in-line measurement of oil products concentration without reagents is presented. The results of reconciliation of the system operation with the results of an accredited chemical laboratory are presented.

Keywords: control of oil products, environmental monitoring, PAHs, polycyclic aromatic hydrocarbons, TPP, flow-through cooling system.

Для цитирования: Баденко В.Л. Непрерывный контроль нефтепродуктов в стоках системы охлаждения ТЭЦ / В.Л. Баденко, Л.М. Молодкина, Ф.Г. Тарасевский // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 1(65). – С. 198-205. – EDN: ULEJZG.

Введение. На сегодняшний день экологическая проблема является одной из ключевых для отрасли энергетики [1]. Политика, проводимая Государственной думой в России, направлена на стабилизацию и подъем экологии в стране. В настоящее время для улучшения состояния водных объектов предусмотрены штрафы как для юридических, так и для частных лиц [2].

Тепловые электрические станции (ТЭС), выступающие ключевыми пользователями водных ресурсов, часто применяют прямоточную систему охлаждения оборудования, используя воду из ближайшего водного объекта (озеро, река и т.д.). Так, береговая насосная станция забирает воду для прохождения контуров системы охлаждения, а далее сбрасывает её обратно в водный объект. Важно упомянуть также входящие в состав системы охлаждения ТЭС маслоохладители пластинчатого или кожухотрубного типа. В данных системах природная вода используется для отвода тепла от масляного контура масоохладителя и далее сбрасывается напрямую в водный объект. Маслоохладители, подверженные высокому износу и могут являться причиной серьезных экологических катастроф, так как нарушение их герметичности приведет к разливу объема нефтепродуктов в акваторию используемого водного объекта. Такого рода утечки ведут не только к экологическим, но и к репутационным потерям теплогенерирующих компаний.

Вероятность возникновения подобной аварийной ситуации высока в случае использования акваторий водных объектов без осуществления постоянного контроля по загрязнению стоков. За последнее

десятилетие в Российской Федерации зафиксирован ряд случаев, когда ТЭС выступали источниками выбросов нефтепродуктов в водные объекты [2,3]. Данные аварии приводят к тяжелым экологическим последствиям неминуемого характера [4] и оказывают влияние как на водные, так и на земельные ресурсы [5,6].

Так, на рисунке 1 представлен график изменения концентрации нефтепродуктов в стоках системы охлаждения ТЭЦ в городе Санкт-Петербург за весенний период 2018 года. Для охлаждения используется водный объект рыбохозяйственного назначения – река Нева.

За выбранный период (2.03.2018-29.05.2018) наблюдается 51 превышение ПДК по параметру «нефтепродукты» для водных объектов соответствующей категории (0,05 мг/дм³).

С целью контроля загрязнений воды, использованной ТЭС, в Российской Федерации разработан нормативный документ РД 153-34.0-02.405-99 «Методические указания по нормированию сбросов загрязняющих веществ со сточными водами тепловых электростанций». Согласно представленным методическим указаниям, ТЭС обязаны согласовывать графики отбора проб стоков с региональными контролирующими организациями. При этом, важно отметить, регулярность (раз в три-десять дней) штатного контроля по показателю «нефтепродукты», исключающую возможность осуществления оперативного мониторинга уровня загрязнений сточных вод.

Также, существуют требования по обязанности ведения учета объема забора водных ресурсов из

водных объектов и объема сброса сточных, в том числе дренажных, вод, представленные в Приказе Минприроды России от 09.11.2020 №903 «Об утверждении Порядка ведения собственниками водных объектов и водопользователями учета объема забора (изъятия) водных ресурсов из водных объектов и объема сброса сточных, в том числе дренажных, вод, их качества». Ввиду вышеизложенного, целесообразным является устройство системы оперативного экологического мониторинга, обеспечивающей поточный контроль сверхнормативной концентрации нефтепродуктов в

системе охлаждения ТЭС.

Целью настоящей работы является разработка системы непрерывного мониторинга наличия нефтепродуктов в потоке системы охлаждения ТЭС, с возможностью потокового определения их массовой концентрации. Задачами исследования является: разработка архитектуры системы мониторинга, выбор контрольных и измерительных приборов входящих в состав системы, обеспечение требуемых условий работы контрольных и измерительных приборов, определение работоспособности предлагаемого метода.

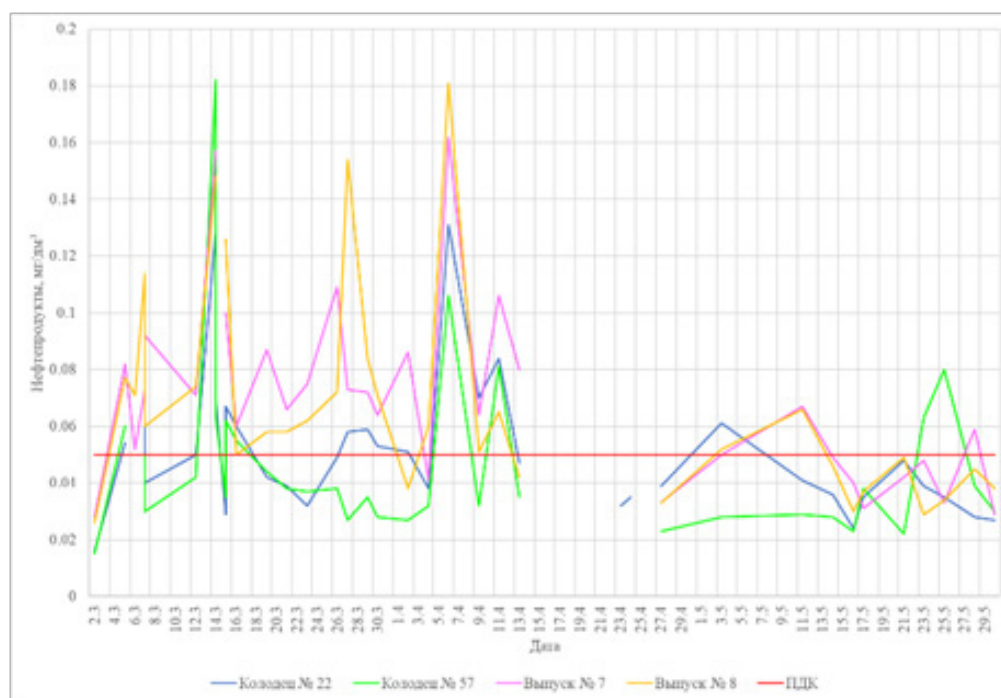


Рисунок 1 – Концентрации нефтепродуктов в системе охлаждения в весенний сезон

Методология. В рамках разработки архитектуры экологического мониторинга системы охлаждения ТЭС определены следующие аспекты, которым должна отвечать система:

- контроль должен осуществляться как по растворенным нефтепродуктам, так и по нефтяной плёнке;
- на каждой точке установки системы должен присутствовать локальный шкаф управления контрольных и измерительных приборов;
- все информация с контрольных и измерительных приборов со всех локальных шкафов должна поступать на автоматизированное рабочее место оператора.

В результате разработана структурная схема метода контроля концентрации нефтепродуктов, представленная ниже на рисунке 2.

Принцип работы рассматриваемой системы устроен следующим образом. Сигналы, собираемые с локально расположенного оборудования (анализатор ПАУ и регистратор нефтяных плёнок) передаются в локальный шкаф управления, размещенный

в непосредственной близости с контрольно-измерительными приборами. Локальный шкаф обеспечивает преобразование первичных сигналов и их передачу на шкаф верхнего уровня по утвержденному протоколу. Далее, в шкафу верхнего уровня осуществляется обработка полученных данных, после чего информация в виде мнемосхем транслируется на информационный щит дежурного станции, оснащенный мониторами отображения состояния системы.

В случае фиксирования нефтяной пленки или сверхнормативной концентрации растворенных нефтепродуктов, представленная система информирует персонал ТЭС визуальным и звуковым сигналом. При этом, на информационном щите представлена информация о месте регистрирования сверхнормативной концентрации, а также о массовой концентрации нефтепродуктов, которая была зафиксирована на точке контроля.

В рассматриваемой системе, точки установки оборудования и входящие в состав системы расположены согласно схеме (рис. 3).



Рисунок 2 – Схема расположения оборудования на точке контроля

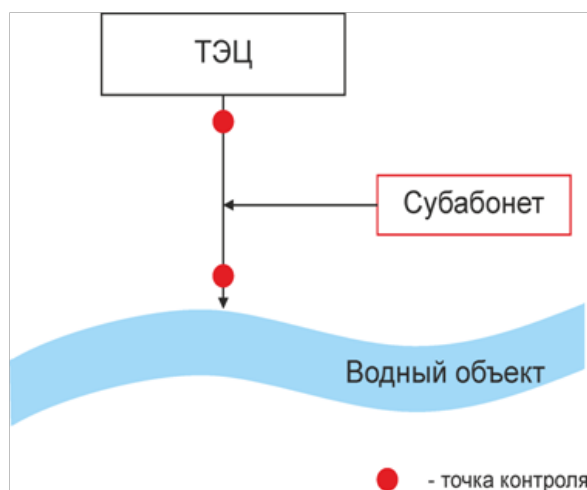


Рисунок 3 – Схема расположения контрольных точек

Устройство контрольных точек системы осуществлено таким образом, что при утечке нефтепродуктов имеется возможность определить, от какой организации происходит поступление загрязнения в сбрасываемые воды, а также выявить, какая группа оборудования является первоисточником возникновения загрязнения.

В рамках выбора контрольных и измерительных приборов определены следующие требования, которым должны отвечать технические устройства:

- измерения массовой концентрации растворенных нефтепродуктов должно происходить не реже 1 раз в 30 секунд;

- контроль наличия нефтяных плёнок должен осуществляться не реже чем 1 раз в 30 секунд.

Сегодня, с целью контроля концентрации нефтепродуктов в потоке зачастую используют датчики, основанные на методах нефелометрии или

флуориметрии. Положительными сторонами от использования данных методов является их адаптация для проведения изменений на контрольной точке, а также наличие точных показаний в условиях работы на объекте. Однако, отсутствие пробоподготовки, при использовании данных методов отражается на показаниях датчиков [7-12].

Рассмотрим прибор отечественного производства: «Флюорат АЕ-2» от компании ООО «ЛЮМЭКС-АвтоХимКонтроль». Метод измерения массовой концентрации нефтепродуктов, применяемый в данном приборе, обеспечивает полное соответствие с лабораторным анализом. Недостатком данного прибора является время проведения одного измерения – от 15 минут, а также сложность конструкции и использование реагента (Гексан), что значительно усложняет процесс обслуживания.

Основываясь на данных, полученных входе

анализа рынка поточных датчиков – измерителей концентрации нефтепродуктов, можно сделать вывод: мобильные датчики, устанавливаемые непосредственно на точку контроля, позволяют полностью решить задачу непрерывного мониторинга концентрации нефтепродуктов в анализируемом потоке и зафиксировать сверхнормативную концентрацию загрязнителя.

По результатам исследования рынка, в качестве прибора измерения массовой концентрации нефтепродуктов выбран потоковый измеритель массовой концентрации полициклических ароматических углеводородов *EnviroFlu* от компании *TriOS*. Данный прибор является флуориметром, так как *EnviroFlu* проводит измерения массовой концентрации ПАУ [мкг/л] посредством измерения интенсивности флуоресценции потока. При использовании данного прибора контроль растворенной формы нефтепродуктов осуществляется путем измерения концентрации косвенного параметра – полициклических ароматических углеводородов (ПАУ). ПАУ представляют собой органические соединения, с характерным наличием в химической структуре трех и более конденсированных бензольных колец [13–17]. Данный показатель используют для контроля концентрации нефтепродуктов в анализируемом образце [13].

Регулярность проведения измерения *EnviroFlu* один раз в 10 секунд. Работа данного прибора осуществляется совместно с контроллером *TriBox*. Контроллер осуществляет вторичное преобразование измерений, получаемых с датчика, а также обеспечивает возможность осуществления корректировки измерений, а именно: вычитание фоновой концентрации и введение коэффициента для пересчета полученного значения на массовую концентрацию подконтрольного нефтепродукта.

Датчик *enviroFlu* и контроллер занесены в реестр средств измерений как приборы измерения массовой концентрации нефтепродуктов (номер регистрации № 77328-20). Наличие приборов в данном реестре обеспечивают легитимность полученных данных и позволяют использовать их в качестве доказательной базы.

Для решения задачи детектирования нерастворенной формы нефтепродукта в потоке жидкости хорошо себя зарекомендовал метод регистрирования нефтяных пленок на поверхности анализируемого потока [14].

В качестве прибора – детектора нефтяной пленки выбран отечественный прибор «Краб», производства компании ООО «ЛЮМЭКС-АвтоХимКонтроль».

В основе метода анализа поверхности жидкости на наличие нефтяной пленки лежит зондирование водной поверхности направленным по вертикали вниз лазерным лучом с заданной длиной волны – 650 нм. Детектирование тонких нефтяных пленок происходит за счёт различия коэффициентов отражения для нефтепродуктов и воды. Рассмат-

риваемый метод позволяет обнаруживать нефтяные пленки толщиной от 0,5 мкм.

В состав прибора входят излучатель (лазерный диод) и одноканальная оптоэлектронная приемная система [14,15]. Регулярность проведения – 30 сек. Ввиду высокой турбулентности потока, исключающей возможность формирования нефтяной пленки на поверхности анализируемого потока, регистратор нефтяных плёнок функционирует совместно с узлом успокоителя потока. Данный узел, за счёт локального сопротивления водному потоку обеспечивает формирование нефтяных пленок даже при турбулентном течении жидкости [14].

Метод определения концентрации нефтепродуктов. В рамках настоящей работы определены факторы, влияющие на проведение потокового измерения массовой концентрации нефтепродуктов.

Ввиду того, что источником жидкости для поточных систем охлаждения являются локальные водные объекты, то анализируемые стоки являются природными стоками, и как следствие, в них имеется фоновая концентрация ПАУ [17–19], изменяющаяся от сезона к сезону. В рамках проведения опытной эксплуатации предлагаемой системы собраны данные, отражающие изменение фоновой концентрации ПАУ.

На рисунке 4 представлен график изменения концентрации ПАУ во времени при поточном измерении потока вод системы охлаждения (р. Нева).

На данном графике отражено измерение фоновой концентрации ПАУ в промежутке 15,5–17,5 мкг/дм³ за 25 минут.

Также, в рамках опытной эксплуатации зафиксировано изменение фоновой концентрации ПАУ при изменении температуры анализируемого потока. Ввиду того, что температура системы охлаждения непостоянна и зависит от количества введенного в работу оборудования, то данный фактор имеет большое влияние на результаты потокового измерения. При этом, необходимо отметить, что интенсивность затухания флуоресценции имеет прямую зависимость от температуры измеряемой жидкости [19,20]. На основе данных, полученных с контроллера *TriBox* и данных о температуре системы охлаждения на точке контроля построены графики, наглядно отражающие вышеуказанную зависимость (рис. 5).

Сопоставляя графики изменения массовой концентрации ПАУ и температуры потока на точке контроля, можно сделать вывод что при изменении температуры жидкости с 10 до 20°C, показания датчика изменились на 2 мкг/дм³ (с 17 до 15 мкг/дм³).

Вышеуказанные факторы учены при разработке алгоритма, обеспечивающего пересчет массовой концентрации ПАУ на массовую концентрацию нефтепродуктов. Предлагаемый алгоритм строится на введении поправочного коэффициента, обеспечивающего корреляцию массовых концентраций ПАУ и нефтепродукта, применяемого в маслоохладителях ТЭС [14, 15].



Рисунок 4 – Данные с контроллера датчика ПАУ

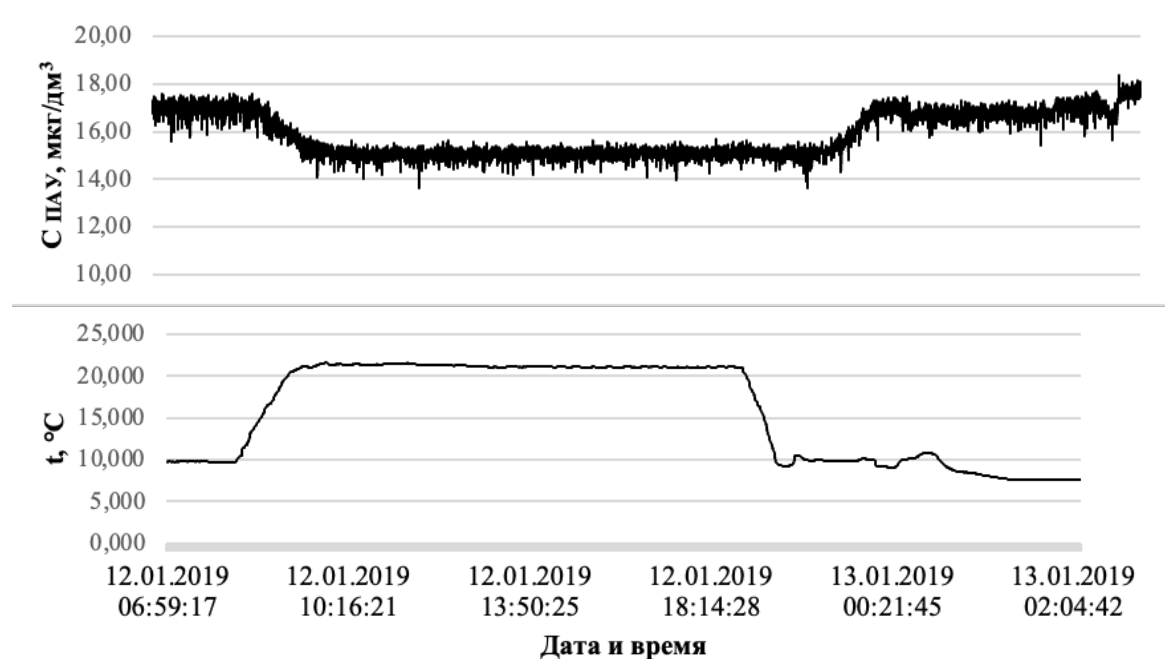


Рисунок 5 – Данные с контроллера датчика ПАУ при измерении фоновых концентраций вод р. Нева

Для решения поставленной задачи создан математический алгоритм, обеспечивающий пересчет массовой концентрации ПАУ, на массовую концентрацию нефтепродукта ТП-22С и позволяющий осуществлять непрерывный контроль за состоянием стоков, сбрасываемых в водный объект по концентрации растворенных нефтепродуктов минуя влияние фоновой концентрации ПАУ и температурных изменений потока.

Данный алгоритм имеет следующие особенности:

- алгоритм предусматривает сравнение двух массивов измерений (с одинаковым количеством измерений в 18 шт.);
- сравнение массивов измерений происходит

регулярно (10 сек.), за счёт чего минимизируется влияние как фоновой концентрации, так и влияние изменения температуры анализируемого потока.

Графически, массивы измеряемых данных изображены на рисунке 6.

Определение массовой концентрации нефтепродуктов (мг/дм³) происходит по формуле:

$$C_1 = \left(\int_1^{18} f(x)dx - \int_{19}^{36} f(x)dx \right) \cdot k / 18000$$

Где k – коэффициент, обеспечивающий пересчет массовой концентрации ПАУ (мкг/дм³) в массовую концентрацию нефтепродукта (мг/дм³)

Коэффициент k , определен эмпирически для подконтрольного нефтепродукта (индустриального масла ТП-22С).

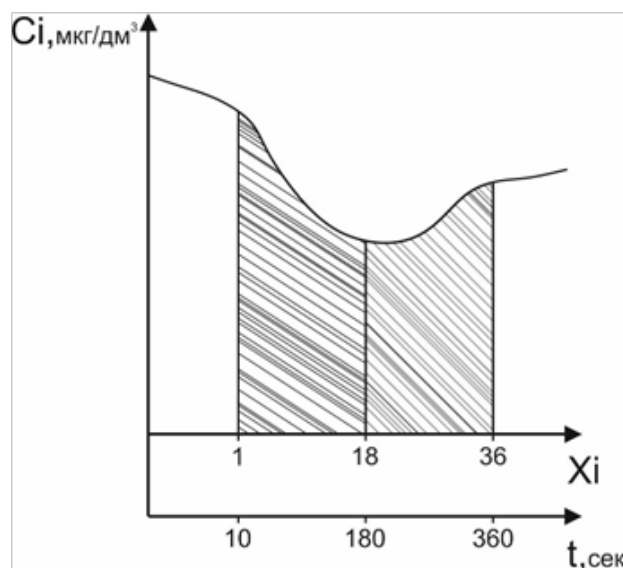


Рисунок 6 – Визуальное отображение сравниваемых массивов измерений

Результаты. В рамках определения работоспособности предлагаемого метода осуществлена сверка между показаниями аккредитованной химической лаборатории ТЭЦ-17 «Выборгская» и разработанной системы. Результаты сверки сведены в таблицу 1.

Показания химической лаборатории получены в результате проведения пробоотбора по методике ПНД Ф 12.15.1-08.

Показания лаборатории сравнивались с показанием разработанной системы экологического мониторинга в тот же момент времени. В случае сильного превышения ПДК, в программе анализировался предварительный временной промежуток, поскольку нефтепродукты в нерастворенной форме могли быть детектированы системой ранее и остаться на

оптической части датчиков, вызывая неточности измерений.

По результатам сверки, сходимость в части измерения массовой концентрации нефтепродуктов – 93%, в части фиксирования сверхнормативной концентрации нефтепродуктов – 100%.

По итогу проведенной работы рассмотрены возможные доработки предлагаемого метода и направление дальнейшей деятельности, к ним относятся:

- доработка алгоритма определения массовой концентрации нефтепродуктов с учётом влияния температуры измеряемого потока и изменения фоновой концентрации ПАУ;
- внесение предлагаемого метода в реестр средств измерения массовой концентрации нефтепродуктов.

Таблица 1 – Результаты сверки

№ п/п	Результат лаборатории, мг/дм³	Результат программы, мг/дм³	Регистратор нефтяных плёнок	Сверка
1	0,169±0,059	0,02	+	+
2	0,082±0,029	0,065	-	+
3	0,059±0,021	0,039	-	+
4	0,068±0,024	0,069	-	+
5	0,057±0,020	0,076	-	+
6	0,069±0,021	0,048	-	+
7	0,077±0,027	0,061	-	+
8	0,078±0,027	0,10	-	+
9	0,094±0,029	0,121	+	+
10	0,060±0,021	0,075	-	+
11	0,057±0,020	0,063	-	+
12	0,061±0,021	0,054	-	+
13	0,055±0,019	0,063	-	+
14	0,056±0,019	0,053	-	+
15	0,055±0,019	0,065	-	+

Обсуждения. Обильный вклад в поточное измерение нефтепродуктов осуществлено в работах Копыльцовой, А.Б. [13, 21]. Важным фактором, который необходимо учитывать при осуществлении поточного контроля нефтепродуктов является их возможность находиться как в растворенном состоянии, так и в эмульгированном состоянии. При этом, различные нефтепродукты имеют различную интенсивность флуоресценции [22], что в целом ставит под сомнение возможность корректного определения массовой концентрации нефтепродуктов в объеме жидкости. О данной проблеме измерения концентрации нефтепродуктов подробно рассказывает Горяева Л. И. в работе [23].

Также, в работе [24] представлен новый метод поточного, безреагентного контроля концентрации нефтепродуктов на основе измерения токопроводимости контрольного образца жидкости с анализируемым потоком.

Выводы. В настоящей работе раскрыты аспекты необходимости контроля концентрации нефтепродуктов в стоках системы охлаждения ТЭС. Представлена архитектура предлагаемой системы, обеспечивающей непрерывный контроль за наличием как растворенной формы нефтепродуктов, так и нефтяной плёнки в системе охлаждения ТЭС.

В рамках работы определены факторы, влияющие на проведение потокового измерения концентрации нефтепродуктов. Представлен алгоритм обеспечивающий потоковое определение массовой концентрации нефтепродуктов с учётом влияния фоновых концентраций и изменением температуры измеряемого потока. Представлены результаты сверки показаний разработанной системы и аккредитованной химической лаборатории, сходимость составила 98% в части измерения массовой концентрации нефтепродуктов и 100% в части детектирования сверхнормативной концентрации нефтепродуктов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Собгайда Н.А., Ольшанская Л.Н. Очистка сточных вод от ионов тяжелых металлов с помощью сорбентов отходов деревообрабатывающей и сельскохозяйственной отраслей промышленности // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2009. – № 9. – С. 43.
2. Егоров В.Н. Механизм оценки экологического ущерба от производственной деятельности // Экономический анализ: теория и практика. – 2015. – №8. – С. 407.
3. Тарановская Е.А., Собгайда Н.А., Алферов И.Н. Очистка сточных вод с применением хитозана // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2015. – № 10(185). – С. 322-325.
4. Бабенко О.Ю. Исследование негативного воздействия на состояние окружающей среды в Российской Федерации // Сервис в России и за рубежом. – 2015. – №2. – С. 58.
5. Арефьев Н.В., Баденко В.Л., Лисовский И. В., Вялышев, А. Прогноз возможного ущерба при выходе нефтепродуктов из затонувших кораблей и судов // Морская радиоэлектроника. – 2009. – № 1 (27). – С. 44-47.
6. Гордей Д.А., Терлеев В.В. Эколого-экономическая оценка технологии восстановления нефтезагрязненных почв Санкт-Петербурга // XXXVIII Неделя науки СПбГПУ, Материалы Международной научно-практической конференции. – 2009. – С. 356-357.
7. Чайковская О.Н., Нечаев Л.В. Взаимодействие полициклических ароматических углеводородов с органическим веществом почв и водных осадков // Издательский Дом Томского государственного университета. – 2017. – С. 124.
8. Маслова Н.В., Кочетова Ж.Ю. Экологический мониторинг нефтепродуктов на территории химически опасного объекта с применением флеш-детектора // Медицина экстремальных ситуаций. – 2017. – №2. – С. 60.
9. Дерпак К.А. Организация производственного экологического мониторинга сточных вод нефтеперерабатывающего завода // Экологические чтения-2021. XII Национальная научно-практическая конференция с международным участием. Омск. 2021. – С. 198-203.
10. Шамирзаев В.Т. Люминесцентный контроль загрязнения воды тяжелыми фракциями нефтепродуктов // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2015. – № 2. – С. 186.
11. Кигель А.А. Контроль содержания нефтепродуктов в системах оборотного водоснабжения // Автоматизация в промышленности. – 2014. – № 5. – С. 30-33.
12. Смердова С.Г. Аналитический контроль процесса сорбционной очистки нефтепродуктов от серосодержащих соединений // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16. – № 8. – С. 295-296.
13. Копыльцова А.Б., Тарасов Б.П. Проблемы поточного контроля нефтепродуктов в воде // Контроль качества продукции. – 2020. – № 2.
14. P. Tarasevsky, V. Badenko. The open flow damper in effluent control system // Magazine of Civil Engineering. 2021. – № 7. – P. 10708.
15. Тарасевский Ф.Г., Баденко В.Л. Метод непрерывного контроля наличия и определения концентрации нефтепродуктов в стоках промышленных предприятий // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. – 2022. – № 3(22). – С. 94-103.
16. Анучин Е.Н. Оптический регистратор нефтяных пленок на взволнованной водной поверхности // Оптический журнал. 2005. Т. 72. № 3. С. 11-14.
17. Harshica F. Distribution of petrogenic polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in seafood following Deepwater Horizon oil spill // Marine Pollution Bulletin. – 2019. – V. 142. – P. 200-207.
18. Xinran L. Indigenous PAH degraders along the gradient of the Yangtze Estuary of China: Relationships with pollutants and their bioremediation implications // Marine Pollution Bulletin. – 2019. – V. 142. – P. 419-427.
19. Sharma B. Spatial gradients of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in air, atmospheric deposition, and surface water of the Ganges River basin // Science of The Total Environment. – 2018. – V. 627. – P. 1495-1504.
20. Ожегов Э.А. Изучение возможности использования полиароматических углеводородов нефти для идентификации нефтяных загрязнений // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». – 2013. – №2.
21. Жук А.С. Разработка универсальных методик количественного определения нефтепродуктов в воде // Журнал СВУ. Химия. – 2014. – №3.
22. А.Б. Копыльцова, Б.П. Тарасов. Лабораторный контроль нефтепродуктов в воде: условность или истина? // Контроль качества продукции. – 2020. – № 1. – С. 55-63.
23. Эмануэль, Н.М. Экспериментальные методы химической люминесценции / Н.М. Эмануэль, М.Г. Кузьмин // Издательство Московского университета. – 1985.
24. Л.И. Горяева, Е.П. Щукина. Разработка стандартного образца, предназначенного для контроля точности результатов измерений содержания нефтепродуктов в воде, и применение его для проверки квалификации лабораторий посредством межлабораторных сличительных испытаний // Эталоны. Стандартные образцы. – 2022. – Т. 18. – № 1. – С. 23-37. DOI 10.20915/2077-1177-2022-18-1-23-37.
25. В.И. Истомин, А.Г. Клименко. Совершенствование методов и приборов контроля концентрации нефтепродуктов в очищенной воде // Системы контроля окружающей среды. – 2022. – № 2(48). – С. 46-50.

Статья поступила в редакцию 16.01.2024

Статья принята к публикации 15.03.2024

УДК 613.6.027

EDN: WTGTZT

**ОЦЕНКА СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ
ОЦЕНКИ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ РИСКОВ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО
ФАКТОРА РАБОТНИКОВ ХОЗЯЙСТВА ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

© Автор 2024

SPIN: 1049-8838

AuthorID: 1159951

ORCID: 0000-0002-0903-5045

ЧАПЛЫГИН Владимир Сергеевич, аспирант

Российский университет транспорта МИИТ

(127994, Moscow, Obraztsova str., 9, p.9., e-mail: waxchaplygin@yandex.ru)

Аннотация. В процессе работы могут возникать ошибки. Такими ошибками определяются действия, отклоняющиеся от ожидаемых и способные привести к серьезным последствиям (материальный ущерб, травмы или гибель людей). Статистика производственного травматизма в электроэнергетике Российской Федерации указывает на то, что основными причинами производственного травматизма в I полугодии 2023 года явились: недостатки в организации работ (26,9% от общего числа пострадавших, рост на 10,5%), личная неосторожность пострадавших (20,5% от общего числа пострадавших, рост на 45,5%). Также рост количества пострадавших отмечается в результате нарушения трудовой и производственной дисциплины (на 25%) и нарушений требований безопасности при эксплуатации транспортных средств (на 50%). Очевидно, что проблеме травматизма требуется решать не только техническими методами, а также следует учитывать и психологические аспекты. Сотрудник нарушает или отказывается выполнять правила и инструкции не из-за незнания методик, технологий, или отсутствия опыта, а по другим причинам, например, из-за внешних факторов, влияющих на образ мышления и жизни, установки, поведение, статус, привычки, мировоззрение, настроение и аспекты повседневной жизни. В статье рассмотрена эффективность применения разработанной Методики оценки профессиональных рисков с учетом влияния человеческого фактора работников хозяйства электрификации и электроснабжения.

Ключевые слова: поведенческий аудит, опасные действия работников, оценка профессиональных рисков, человеческий фактор.

**ASSESSMENT OF THE SOCIO-ECONOMIC EFFICIENCY OF THE APPLICATION OF THE
METHODOLOGY FOR ASSESSING OCCUPATIONAL RISKS, TAKING INTO ACCOUNT
THE INFLUENCE OF THE HUMAN FACTOR OF EMPLOYEES OF THE ELECTRIFICATION
AND POWER SUPPLY FACILITIES**

© The Author 2024

CHAPLYGIN Vladimir Sergeevich, phd student

Russian University of Transport MIIT

(127994, Moscow, Obraztsova str., 9, p.9., e-mail: waxchaplygin@yandex.ru)

Abstract. Errors may occur during operation. Such errors determine actions that deviate from the expected ones and can lead to serious consequences (material damage, injury or death of people). Statistics of industrial injuries in the electric power industry of the Russian Federation indicate that the main causes of industrial injuries in the first half of 2023 were: shortcomings in the organization of work (26.9% of the total number of victims, an increase of 10.5%), personal negligence of victims (20.5% of the total number of victims, an increase of 45.5%). There is also an increase in the number of victims as a result of violations of labor and industrial discipline (by 25%) and violations of safety requirements during the operation of vehicles (by 50%). Obviously, the problem of injuries needs to be solved not only by technical methods, but also psychological aspects should be taken into account. An employee violates or refuses to comply with rules and instructions not because of ignorance of techniques, technologies, or lack of experience, but for other reasons, for example, due to external factors affecting the way of thinking and life, attitudes, behavior, status, habits, worldview, mood and aspects of daily life. The article considers the effectiveness of the application of the developed Methodology for assessing occupational risks, taking into account the influence of the human factor of workers in the electrification and power supply sector.

Keywords: behavioral audit, dangerous actions of employees, assessment of occupational risks, human factor.

Для цитирования: Чаплыгин В.С. Оценка социально-экономической эффективности применения методики оценки профессиональных рисков с учетом влияния человеческого фактора работников хозяйства электрификации и электроснабжения / В.С. Чаплыгин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 1(65). – С. 206-211. – EDN: WTGTZT.

Введение. На сегодняшний день выявление и оценка факторов профессионального риска [1, 15] определяет планирование и реализацию мероприятий, направленных на нейтрализацию, компенсацию или минимизацию ущерба, который может возникнуть в результате реализации негативных проявлений риска, или на усиление положительных эффектов, возникающих в результате реализации событий, связанных с риском [8].

Оптимально определить способ оценки уровня профессиональных рисков в хозяйстве электрификации и электроснабжения позволяют такие показатели, как доступность ресурсов, внутренние факторы опасности и специфика выполняемых работ. Тем не менее, принятие к учету влияния человеческого фактора в эксплуатационной деятельности Трансэнерго является на сегодня нерешенной в

полной мере задачей.

В рамках проведенного исследования воздействия человеческого фактора на возникновение случаев травмирования хозяйства электрификации и электроснабжения установлено, что из общего количества несчастных случаев, основной причиной явился – сам работник, его труд, деятельность, средства труда. Рассматривая период 10 лет, наибольшее количество лиц, нарушения требований охраны труда которых оказали воздействие на возникновение случаев травмирования на производстве, явились сами пострадавшие – 127 человек, или 37% от всех лиц причастных к несчастным случаям; непосредственные руководители работ – 97, или 28%; руководители и (или) инженерно-технические работники – 65, или 19%; другие исполнители работ – 59 работников, или 17% (рис. 1).

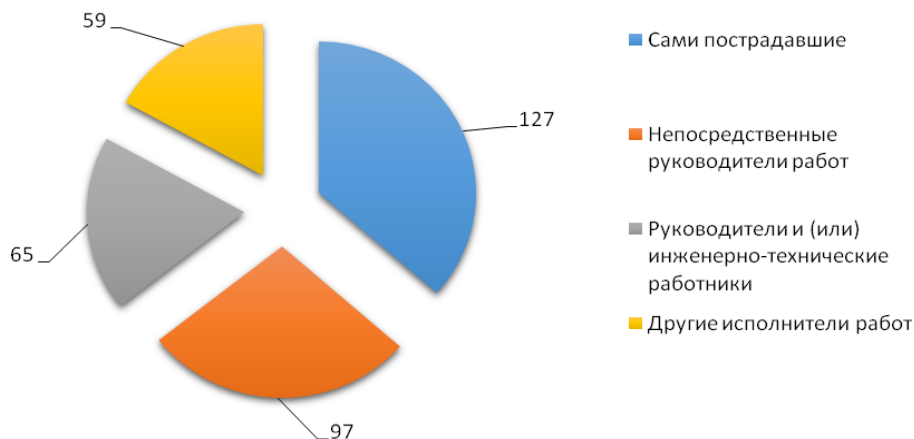


Рисунок 1 – Распределение лиц причастных к несчастным случаям в хозяйстве электрификации и электроснабжения

Неизменная статистика электротравматизма, является следствием незрелого подхода к проблеме. Усиление внешнего контроля со стороны руководителя или производителя работ (а именно эта категория персонала практически во всех случаях признается ответственным за несчастный случай) не компенсирует эргономические несоответствия: неэффективность профессионального обучения опасному и психологически сложному труду.

Снизить количество травматизма и повысить безопасность производственных процессов путем усовершенствования управления профессиональными рисками в хозяйстве электрификации и электроснабжения позволит внедрение на все производственные подразделения Трансэнерго алгоритма управления влиянием человеческого фактора на риск травм в соответствии с разработанной автором «Методикой оценки профессиональных рисков с учетом влияния человеческого фактора работников хозяйства электрификации и электроснабжения» [10] (далее – Методика).

В отношении опасного труда, каким является обслуживание энергетического оборудования, такая модернизация является не только желательной, но настоящей, поскольку эргономические рас-

согласования впоследствии могут привести не просто к снижению эффективности, но к инцидентам и несчастным случаям.

Методология. В октябре 2023 года в хозяйстве электрификации и электроснабжения, а именно 2 дистанциях электроснабжения (в Смоленской дистанции электроснабжения Московской дирекции по энергообеспечению, Новокузнецкой дистанции электроснабжения Западно-Сибирской дирекции по энергообеспечению и на Московском производственном участке Октябрьской дирекции капитального ремонта и реконструкции объектов электрификации и электроснабжения (далее – пилотные подразделения) была проведена пилотная апробация Методики оценки профессиональных рисков с учетом влияния человеческого фактора работников хозяйства электрификации и электроснабжения» [10, 19, 20, 23, 24].

В рамках апробации Методики в пилотных подразделениях были определены уровни профессиональных рисков для персонала, занятого на ремонте и обслуживании устройств электроснабжения. Алгоритм оценки профессиональных рисков с учетом влияния человеческого фактора на безопасность производственного процесса включал в себя:

- определение критериев допустимого уровня риска травмирования работников;
- определение параметров характеристик человеческого фактора, обеспечивающих допустимый уровень риска;
- оценка параметров, характеризующих человеческий фактор;
- сопоставление требуемых и действительных параметров характеристик человеческого фактора;
- приведение параметров характеристик человеческого фактора в соответствие с требованиями;
- осуществление производственного процесса с «приемлемым уровнем риска».

Для приведения поведенческих реакций работников к критериям, требуемым для поддержания безопасности труда на уровне, исключающим травматизм, наиболее действенным механизмом стал проведенный поведенческий аудит (далее – ПАБ) [10, 29].

При проведении ПАБ применялись тестирование профессиональных способностей, поведенческое интервью и наблюдение. При проведении беседы с наблюдаемыми работниками во время выполнения работ применялась памятка по проведению беседы с работниками и по итогам заполнялась форма отчёта по поведенческому аудиту безопасности труда.

Оценка профессиональных компетенций проводилась в очной форме при помощи тестов профессиональных знаний и навыков, в оборудованном персональными компьютерами классе с доступом в сеть Интранет в формате тестирования в присутствии специалиста по компетенциям. По результатам тестирования профессиональных знаний и способностей, у 45% участников определен недостаточный уровень переподготовки и недостаточное знание железнодорожных систем, применяемых в их трудовой деятельности.

При поведенческом интервью с персоналом велась беседа для раскрытия не только предположительных проблем, но и реальных, с которыми приходилось сталкиваться в течение рабочего дня. Исследование результатов поведенческого интервью позволило сделать вывод, что 10% работников не справляются с определенными рабочими задачами (неправильно интерпретируют устные сообщения и не способны оценить ситуацию в нестандартной и аварийной ситуации).

Наблюдение за сотрудниками стало главной составляющей поведенческого аудита, осуществляемого с помощью инновационных устройств, позволяющих записывать видеоматериалы о рабочих процессах непосредственно во время выполнения производственных задач. В ходе наблюдения внимание уделялось всем деталям выполнения работ, что позволило оценить рабочий процесс в целом.

Проведенный анализ результатов личностных рисков и катализаторов нарушений показал, что 60% от общего числа участников пилотного проекта состояли в группе низкого риска – но высокого катализатора

нарушений, 31 % – в группе высокого риска, высоких катализаторов нарушений, т. е. в группе повышенного риска и только 9% – в группе низких рисков и низких катализаторов нарушений.

Результаты ПАБ в рамках проведенной апробации Методики, позволили как выявлять работников, действия которых в той или иной мере могут являться катализаторами возникновения опасных ситуаций, так и принимать нестандартные решения по повышению профессионально – важных качеств [9] и готовности работников соблюдать требования, необходимые для устойчивого и безопасного труда.

По итогам ПАБ, в пилотных подразделениях были разработаны мероприятия, направленные на снижение уровня профессионального риска с учетом оценки влияния человеческого фактора [9, 13].

Результаты. Сформированная система управления охраной труда, дополненная и откорректированная комплексными мерами и мероприятиями по результатам апробации, в том числе позволила снизить показатели производственного травматизма и коэффициента его частоты относительно аналогичного периода 2022 г. и подтвердить практическую значимость Методики в пилотных подразделениях

Основные комплексные меры и мероприятия, способствующие повышению эффективности системы управления охраной труда в пилотных подразделениях (рис. 2).

Одним из примеров повышения эффективности системы управления охраной труда следует выделить адресную работу с теми сотрудниками, у которых имеются личностные риски и высокие катализаторы нарушений. Целенаправленная работа и реализация основных комплексных мер и мероприятий, предложенных в Методике, поможет улучшить профессиональные и коммуникативные навыки работников, тем самым снизить влияние человеческого фактора [14, 21, 22].

Другим элементом профилактики является внедрение новых моделей комплектов для защиты от поражения электрическим током наведенного напряжения. Пилотным полигоном была определена Горьковская дирекция по энергообеспечению. В которой разработано и утверждено «Техническое задание на комплект для защиты от поражения электрическим током наведенного напряжения ЭП-4(0) УКС с функциями контроля сопротивления электропроводящего комбинезона, правильного применения комплекта, сигнализации о протекании тока через комплект и возможностью сохранения данных».

Департаментом экологии и техносферной безопасности совместно с Трансэнерго были проведены эксплуатационные испытания комплектов защитных от поражения электрическим током наведенного напряжения ЭП-4(0) «Энерго-Тесла» КОМБИ с устройством УКС. По результатам эксплуатационных испытаний получены положительные отзывы по качеству и эксплуатационным свойствам на данные комплекты.

	разработана Программа мероприятий, направленных на обеспечение эффективного функционирования системой управления охраной труда и безопасностью производственных процессов	...		участие в селекторных совещаниях, проведение рабочих собраний по охране труда
	приобретены переносные видеокамеры для контроля за фактом и качеством проведения целевых инструктажей по охране труда, выполнением мероприятий по подготовке рабочего места	...		предупреждение и выявление нарушений требований охраны труда
	проведение вебинаров с руководителями среднего звена в системе дистанционного обучения	...		организация обучения по охране труда, оказание методологической помощи
	организация работы в выходной (праздничный день) установлена только по согласованию с руководителями дирекции	...		57% смертельно травмированных работников выполняли работу в нерабочее время
	созданы рабочие группы (руководители, специалисты по охране труда Трансэнерго и дирекции по энергообеспечению)	...		оценка влияния психофизиологических факторов, разработка НТД по охране труда

Рисунок 2 – Принимаемые меры по увеличению эффективности функционирования системы управления охраной труда

Процедура оценки социально-экономического эффекта от использования Методики основана на анализе данных по снижению производственных травм и уменьшению рисков, связанных с человеческим фактором.

Так, результаты проведенного анализа, демонстрируют снижение процента травмирования работников по группам причин, связанных с человеческим фактором.

Проведение разъяснительной работы с руководителями и инженерно-техническими работниками дистанции, объяснение целей и задач личного их участия по снижению влияния психофизиологического фактора [6, 17] на опасные действия, которые могут привести к травматизму, так же положительно повлияли на снижение уровня профессиональных рисков у работников тяговых подстанций, ремонтно – ревизионного участка, районов электроснабжения.

Методы повышения продуктивности контрольно-профилактической деятельности по охране труда в подразделениях, а также проведение поведенческого аудита безопасности с учётом важности культуры безопасности, значительно увеличили уровень ответственности персонала при выполнении своих

трудовых функций [5, 25, 26, 30-32].

Реализация Методики оценки профессиональных рисков с учетом влияния человеческого фактора работников хозяйства электрификации и электроснабжения [10] в пилотных подразделениях подтвердило экономический эффект, который обусловлен снижением затрат, связанных с производственным травматизмом, общей и профессиональной заболеваемостью, повышением производительности труда, сокращением потерь рабочего времени, выплатой компенсаций за работу с вредными и опасными условиями труда [7].

В конечном итоге, с учётом ценностей культуры безопасности труда, применение Методики может способствовать: повышению уровня ответственности персонала при выполнении своих трудовых функций и снижению рисков получения работником травм.

По окончании апробации Методики в пилотных подразделениях проводилась оценка удовлетворённости работой персоналом в компании и непосредственно в подразделении. По отношению к началу 2023 года определен рост вовлеченности персонала к ценностям культуры безопасности и готовности применять правила безопасности при выполнении работ на 45% (рис. 3).

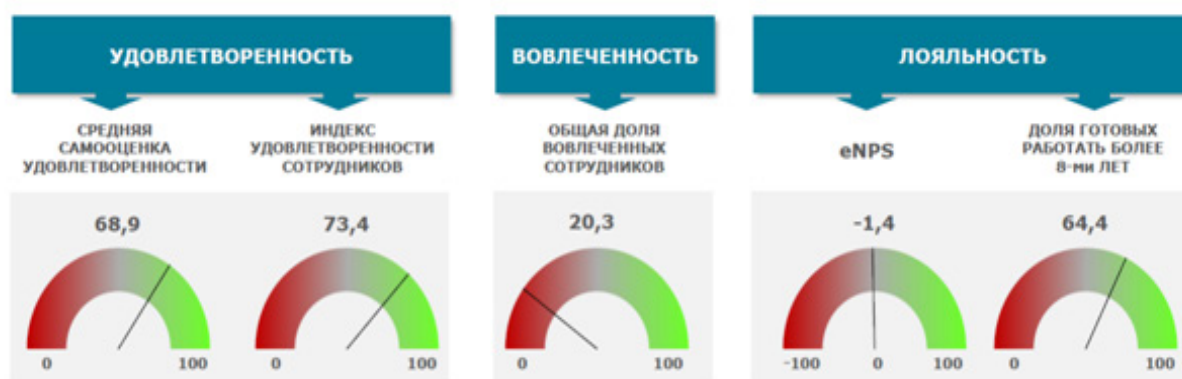


Рисунок 3 – Основные показатели удовлетворенности и вовлеченности сотрудников по результатам оценки удовлетворённости работой персоналом в пилотных подразделениях

Обсуждение. Эффективность применения разработанной Методики определена как экономическая и социальная. Уменьшение потерь труда, обусловленных указанными факторами, представляет собой прямой экономический эффект [2]. Кроме этого, достигаемый эффект от внедрения Методики носит социальный характер:

- повышение безопасности производственных процессов – снижение риска получения работниками травм, сохранение их жизни и здоровья;

- поддержание высокого уровня профессиональной компетентности персонала [3, 4] и его готовность в решении задач, что в свою очередь, способствует повышению производительности труда.

Экономическая эффективность подтверждена путем реализации каждого условия формирования человеческого фактора.

Социальный эффект достигнут за счет: повышения наглядности, прозрачности, обоснованности процедуры проведения оценки профессиональных рисков и получения ее результатов, влияющих на состав формируемых мероприятий для снижения уровня травматизма; вовлечения работодателей в принятие управленческих решений по организации по результатам проводимой работы в рамках оценки рисков с учетом воздействия человеческого фактора [16].

Экономический эффект от внедрения Методики целесообразно сформирован за счет принятия правильных управленческих решений, направленных на предупреждение возникновения опасных ситуаций и инцидентов, допущенных по вине негативного влияния человеческого фактора на производстве.

Практическая реализация Методики оценки профессиональных рисков с учетом влияния человеческого фактора работников хозяйства электрификации и электроснабжения [9, 10] позволила работодателю:

- определить основные психологические особенности сотрудников, у которых возникают проблемы с психическим (эмоциональным) состоянием в стрессовых ситуациях в процессе трудовой деятельности.

- оптимизировать распределение персонала, учитывая их профессиональные качества, чтобы в случае необходимости внести изменения в состав бригады и/или выполняемый функционал работников на основе анализа их индивидуально-психологических характеристик. Это позволит управлять (минимизировать) профессиональные риски.

- создать благоприятную психологическую атмосферу в коллективе путем улучшения условий труда и минимизации риска травмирования. На основе полученных данных определить наиболее эффективные меры для повышения безопасности труда, включая развитие профессиональных навыков, как работников (преимущественно рабочих профессий), так и руководителей среднего звена для достижения нулевого уровня травматизма [10, 28].

Выводы. В перспективе наиболее актуальной задачей является цифровизация процедуры проведения ПАБ (регистрации, обработки данных и реестра – автоматическое формирование необходимых форм), которая существенно улучшит эффективность процесса проведения ПАБ, а также дополнит прозрачностью, качеством и достоверностью данных за счет полноты информации и отсутствия ошибок.

Стоит подчеркнуть, что для увеличения результативности пилотного проекта на всех этапах его реализации необходима обратная связь от работников. Она позволяет оперативно доработать связанные с этим процессы. При этом для повышения качества процесса приведения требуемых характеристик персонала к безопасным, в перспективе возможно внедрение в ОАО «РЖД» нового вида производственного контроля состояния охраны труда – «Поведенческого аудита безопасности труда» (ПАБ), представляющего собой пошаговую систему, при которой руководитель наблюдает за поведением работников на рабочем месте с целью определения стратегий поведения, а затем получают обратную связь от работников. Проведение такого рода аудита позволит определить текущий уровень культуры безопасности, выявить наиболее мотивированных сотрудников и дать возможность сотрудникам выявлять и устранять риски при выполнении своих должностных обязанностей на всех этапах трудового процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Безопасное исполнение трудовых обязанностей – фундамент системы управления профессиональными рисками в организации / Р.Р. Шангареев // Нефтегазовое дело. – 2020. – №2. – С.139-156. – eISSN: 1813-503X.
2. Щербакова И.А. Человеческий фактор в управлении рисками // Креативная экономика. – 2010. – Том 4. – № 3. – С. 125-131.
3. Омельченко Н.В. Формирование коммуникативной компетентности персонала / Н.В. Омельченко, Л.С. Скрипченко // Управление персоналом и интеллектуальными ресурсами в России. – 2021. – № 2. – С. 40-45. – ISSN: 2305-7807.
4. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов, утвержденные Министерством экономики РФ, Министерством финансов РФ, Государственным комитетом РФ по строительной, архитектурной и жилищной политике 21 июня 1999 г. № ВК 477.
5. Апатцев В.И. Основные направления совершенствования системы подготовки кадров, обеспечивающих безопасность производственных процессов / В.И. Апатцев, В.А. Аксенов, Д.Л. Раенок, А.М. Завьялов // Наука и техника транспорта. – 2014. – № 1. – С. 93–97. – EDN: SBIFUH.
6. Возможность снижения человеческого фактора за счёт развития профессиональных психофизиологических качеств работников / С.В. Долгополов, А.М. Завьялов // Техносферная безопасность городских агломераций: Сборник международной школы-конференции, Москва, 14-16 декабря 2020 года. – Москва: Российский университет транспорта, 2021.
7. Управление профессиональными рисками и методика их оценки: сборник трудов молодых ученых и специалистов транспортной отрасли // Современные подходы к обеспечению гигиенической, санитарно-эпидемиологической и экологической безопасности на железнодорожном транспорте. – Москва, 2019. – 237 с. – ISBN 978-5-907090-56-9.

8. Демкин И.В. Управление инновационным риском на основе имитационного моделирования часть 1. Основные подходы к оценке инновационного риска/ И.В. Демкин // Проблемы анализа риска. – 2005. – Т. 2. – № 3. – С. 249-273. – EDN: NUESIB.
9. Сомова, Ю.В. Исследование человеческого фактора в системе человек-техническая система-производственная среда с целью повышения безопасности труда на основе этиологии несчастных случаев / Ю.В. Сомова, Т.В. Свиридова, Э.И. Соколова // Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении: Сборник научных статей 5-й Всероссийской нацнотехнической конференции с международным участием, Курск, 14 февраля 2020 года / Редакция: А.А. Горохов. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2020. – С. 304-310. – EDN FX-SINL.
10. Чаплыгин, В.С. Методика оценки профессиональных рисков с учетом влияния человеческого фактора работников хозяйства электрификации и электроснабжения / В.С. Чаплыгин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3. – С. 111–118. – EDN: GLKQTR.
11. Чаплыгин, В.С. Анализ используемых инструментов оценки профессиональных рисков для работников хозяйства электрификации и электроснабжения / В.С. Чаплыгин, В.А. Аксёнов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2023. – №2(90). – С. 38-44/ ISSN: 0201-727X.
12. Динамика производственного травматизма в электроэнергетике Российской Федерации и меры по его профилактике // Электроэнергия. Передача и распределение. – Москва, 2023. – №5(80). – С. 158-164/ EDN: IRKVDN.
13. Rudakov, M.L. Assessment of the individual risk of fatal injury to coal mine workers during collapses / M.L. Rudakov, E.N. Rabota, K.A. Kolvakh // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2020. – № 4. – PP. 88-93.
14. Повышение эффективности деятельности персонала на основе развития профессионально важных качеств работников: сборник статей Международной научно-практической конференции «Современные тенденции развития социально-гуманитарных наук», Петрозаводск, 20 декабря 2021 г. – Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука», 2021. – С. 161-166 / EDN: ZTKKLY.
15. Аксёнов, В.А. Оценка результатов внедрения методики оперативной оценки профессиональных рисков для работников производственных участков вагонного хозяйства/ В.А. Аксёнов, В.С. Косякин, А.М. Завьялов // Наука и техника транспорта. – 2020. – №1. – С. 104–107/ ISSN: 2074-9325.
16. Старых С.А. Анализ мотивации человеческих ресурсов в достижении эффективной деятельности организации// ООО "Издательский дом "Академия естествознания"/ Фундаментальные исследования. – 2018. – №10. – С. 97-101. ISSN: 1812-7339.
17. Разработка системы профессионального отбора и определения готовности персонала к выполнению работ с учетом влияния психофизиологических факторов: тезисы докладов XIII Всероссийской конференции молодых ученых, специалистов и студентов: «Новые технологии в газовой промышленности (газ, нефть, энергетика)», Москва, 22-25 октября 2019 г. – Москва: Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, ПАО "Газпром", 2019. – С. 558-559 EDN: XENUUI.
18. Системный подход как неотъемлемая часть управления рисками деятельности предприятия: материалы международной научно-практической конференции «Наука сегодня: вызовы и перспективы», Вологда, 23 сентября 2020 г. – С. 90-94 / – EDN: GJRRHR.
19. Распоряжение ОАО «РЖД» от 29.12.2017 № 2805/р об утверждении СТО РЖД 15.014-2017 Система управления охраной труда в ОАО «РЖД». Управление профессиональными рисками. Общие положения.
20. ГОСТ 12.0.230.5-2018. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Системы управления охраной труда. Методы оценки риска для обеспечения безопасности выполнения работ: принят и введен в действие от 1 июня 2019 г. – Москва.: Стандартинформ, 2019. – 23 с.
21. Yampol'skaya E.G., Shardaeva E.F., Elizarova V.V. Examining a correlation between overall physical working capacity and morbidity. Psikhofiziologicheskie aspekty trudovoi deyatelnosti: vsrossiiskii sbornik nauchnykh statei. Tver', 2002, pp. 43-49 (in Russian).
22. Matyukhin V.V., Bukhtiyarov I.V., Yushkova O.I., Shardaeva E.F., Kalinina S.A., Elizarova V.V., Yampol'skaya E.G., Poroshenko A.S. Developing criteria for assessing overstrain and harmonizing standards for physical working capacity in workers employed in contemporary working conditions. / Aktual'nye problemy meditsiny truda: sbornik trudov instituta. In: I.V. Bukhtiyarov ed. Moscow, ООО "Melga" Publ., 2015. – pp. 38-90 (in Russian). EDN: UOJCPT.
23. Polukarov O.I., Prakhovnik N.A., Polukarov Y.O. Assessment of occupational risks: New approaches, improvement, and methodology // International Journal of Advanced and Applied Sciences. – 2021. – Vol. 8. – No 11. – P. 79-86. DOI: 10.21833/IJAAS.2021.11.011 EDN: CGKLOI.
24. Klimova E.V., Semeykin A.Y., Nosatova E.A. Improvement of processes of professional risk assessment and management in occupational health and safety system // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Chelyabinsk, 26-28 сентября 2018 года. Chelyabinsk: Institute of Physics Publishing, 2018. – P. 012198. DOI: 10.1088/1757-899X/451/1/012198 EDN: UDEMPV.
25. Caputo A.C., Pelagagge P.M., Salini P. AHP-based methodology for selecting safety devices of industrial machinery // Safety Science. – 2013. – 53. – P. 202-218.
26. Rathnayaka S, Khan F, Amyotte P. Risk-based process plant design considering inherent safety // Safety Science. 2014. 70, pp. 438-464.
27. Khanzode VV, Maiti J, Ray PK. Occupational injury and accident research: A comprehensive review // Safety Science. 2012. 50(5). – P. 1355-1367.
28. Bogomolov, A.S., et al. (2017) The dynamical cause-effect links' presentation in human-machine systems. News Saratov Univ. (N. S.). Math. Mech. Inform. 17(1). – P. 109-116. EDN: YNBYDT.
29. Kopytenkova O.I. Behavioral audit of safety as a tool for decreasing occupational health and safety risk of healthcare providers / O.I. Kopytenkova, E.A. Shilova // Vestnik of Saint Petersburg University. Medicine. – 2020. – Vol. 15. – No 1. – P. 85-89. DOI: 10.21638/spbu11.2020.109. EDN: YBXSNU.
30. Pidgeon, N.F. Safety Culture and Risk Management in Organizations / N.F. Pidgeon // Journal of Cross Cultural Psychology. – 1991. – V. 22 (1). – P. 129-140. DOI: 10.1177/0022022191221009 EDN: JNCPLT.
31. Le Coze J.C. How safety culture can make us think / Le Coze J.C. // Safety Science. – 2019. – V. 118. – P. 221-229. DOI: 10.1016/j.ssci.2019.05.026.
32. Nunu W.N. An evaluation of the effectiveness of the Behaviour Based Safety Initiative card system at a cement manufacturing company in Zimbabwe / W.N. Nunu, T. Kativhu, P. Moyo // Safety and Health at Work. – 2018. – V. 9. – No 3. – P. 308-313. 10.1016/j.shaw.2017.09.002. DOI: 10.1016/j.shaw.2017.09.002.

Статья поступила в редакцию 13.12.2023

Статья принята к публикации 15.03.2024

УДК 331.45

EDN: OPBADE

МЕТОДИКА РАСЧЕТА КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ОПАСНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

© Автор(ы) 2024

SPIN: 4305-2071

Author ID: 967593

ORCID: 0000-0003-3771-6590

Researcher ID: AKK-7102-2021

Scopus ID: 57200275629

БОРИСОВА Анастасия Викторовна, кандидат технических наук,

доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности»

Ростовский государственный университет путей сообщения

(344038, Россия, Ростов-на-Дону, площадь Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, дом 2,

e-mail: nastja004@bk.ru)

SPIN: 7772-2802

Author ID: 1095601

ORCID: 0000-0003-2727-7221

БАЛАНОВА Марина Васильевна, кандидат технических наук,

доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности»

Ростовский государственный университет путей сообщения

(344038, Россия, Ростов-на-Дону, площадь Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, дом 2,

e-mail: fmv04@mail.ru)

SPIN: 3202-2790

Author ID: 1108039

ORCID: 0000-0002-9386-905X

Researcher ID: AAK-9232-2021

КОЗЛЮК Виталий Викторович, кандидат технических наук,

доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности»

Ростовский государственный университет путей сообщения

(344038, Россия, Ростов-на-Дону, площадь Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, дом 2,

e-mail: kvv_555@mail.ru)

SPIN: 7184-8977

Author ID: 512250

ORCID: 0000-0002-8669-1476

Researcher ID: AKK-8087-2021

ЧУБАРЬ Евгения Петровна, кандидат технических наук,

доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности»

Ростовский государственный университет путей сообщения

(344038, Россия, Ростов-на-Дону, площадь Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, дом 2,

e-mail: jeeeyn@mail.ru)

Аннотация. Разработан подход к количественной оценке потенциальной опасности производственных процессов, учитывающий надежность технических систем объекта контроля, влияние субъекта (человеческий фактор) и влияние внешних факторов опасности на потенциально опасный объект. В результате проведенных исследований решены следующие задачи: определена природа основных негативных воздействий факторов опасности на функционирование потенциально опасного объекта; предложена количественная оценка факторов опасности различной природы на функционирование потенциально опасного объекта (блок показателей технической надежности, блок показателей воздействия субъекта, блок показателей опасности внешнего воздействия); предложен подход к определению необходимости осуществления управленческих мер по повышению уровня безопасности потенциально опасного объекта; проведено практическое применение предложенного подхода на конкретном объекте. Предлагаемый подход к количественной оценке потенциальной опасности производственных процессов составляет практическую ценность с точки зрения трех сторон. Для государственных органов надзора – как предмет анализа фактического состояния опасности объекта контроля, результаты которого являются основой для принятия решений по применению соответствующих санкций. Для страховых компаний – как предмет определения возможности возникновения чрезвычайных ситуаций на рассматриваемом объекте и основания для определения размеров стоимости страховых полисов и выплат при возмещении материального ущерба. Для руководителя организации практическую ценность результаты исследования составляют как предмет помощи в принятии управленческих решений, связанных с разработкой стратегии безопасности на объекте контроля. Дальнейшие исследования планируется посвятить разработке

механизмов управления техногенной безопасностью потенциально опасных объектов на основе данных, полученных посредством применения предложенного подхода к количественной оценке состояния безопасности.

Ключевые слова: методика, расчет, количественная оценка, потенциальная опасность, производственных процессов.

METHODOLOGY FOR CALCULATING A QUANTITATIVE ASSESSMENT OF THE POTENTIAL HAZARD OF PRODUCTION PROCESSES

© The Author(s) 2024

BORISOVA Anastasia Viktorovna, candidate of technical sciences,
associate professor of the Department of "Life Safety"

Rostov State Transport University

(344038, Russia, Rostov-on-Don, Rostov Infantry Regiment Square, house 2, e-mail: nastja004@bk.ru)

BALANOVA Marina Vasilyevna, candidate of technical sciences,
associate professor of the Department of "Life Safety"

Rostov State Transport University

(344038, Russia, Rostov-on-Don, Rostov Infantry Regiment Square, house 2, e-mail: fmv04@mail.ru)

KOZLYUK Vitaly Viktorovich, candidate of technical sciences,
associate professor of the Department of "Life Safety"

Rostov State Transport University

(344038, Russia, Rostov-on-Don, Rostov Infantry Regiment Square, house 2, e-mail: kvv_555@mail.ru)

CHUBAR Evgeniya Petrovna, candidate of technical sciences,
associate professor of the Department of "Life Safety"

Rostov State Transport University

(344038, Russia, Rostov-on-Don, Rostov Infantry Regiment Square, house 2, e-mail: jeeeyn@mail.ru)

Abstract. An approach has been developed to quantitatively assess the potential danger of production processes, taking into account the reliability of the technical systems of the control object, the influence of the subject (human factor) and the influence of external hazards on a potentially dangerous object. As a result of the research, the following tasks were solved: the nature of the main negative impacts of hazard factors on the functioning of a potentially dangerous object was determined; a quantitative assessment of hazard factors of various natures on the functioning of a potentially dangerous object is proposed (a block of indicators of technical reliability, a block of indicators of the subject's impact, a block of indicators of the danger of external influence); an approach to determining the need to implement management measures to improve the safety level of a potentially dangerous facility is proposed; The practical application of the proposed approach was carried out on a specific object. The proposed approach to quantifying the potential hazards of production processes is of practical value from the point of view of three aspects. For government supervisory authorities - as the subject of analysis of the actual state of danger of the object of control, the results of which are the basis for making decisions on the application of appropriate sanctions. For insurance companies - as a subject for determining the possibility of emergency situations occurring at the facility in question and the basis for determining the size of the cost of insurance policies and payments for compensation of material damage. For the head of the organization, the results of the study are of practical value as a subject for assistance in making management decisions related to the development of a safety strategy at the control object. Further research is planned to be devoted to the development of mechanisms for managing the technogenic safety of potentially dangerous objects based on data obtained through the application of the proposed approach to quantitative assessment of the safety state.

Keywords: methodology, calculation, quantitative assessment, potential danger, production processes.

Для цитирования: Борисова А.В. Методика расчета количественной оценки потенциальной опасности производственных процессов / А.В. Борисова, М.В. Баланова, В.В. Козлюк, Е.П. Чубарь // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 1(65). – С. 212-217. – EDN: OPBADE.

Введение. Оценка состояния безопасности производственных процессов состоит в определении и оценки их потенциальной опасности. С этой целью необходимо определить основное негативное влияние факторов опасности разной природы на функционирование объекта контроля. Поэтому актуальной проблемой является обеспечение безопасности производственных процессов и предупреждение чрезвычайных ситуаций в рамках оценки их потенциальной опасности [1, 2].

Обеспечение безопасности производственных

процессов в первую очередь заключается в проведении предварительной оценки их состояния с точки зрения безопасности, поэтому в работе проанализированы литературные источники, в которых рассматриваются вопросы оценки опасности производственных процессов [3, 4].

Наиболее распространенным методом оценки потенциальной опасности производственных процессов является разработка формализованных моделей развития событий – использование метода «дерева отказов». В Соединенных Штатах Америки и Япо-

нии наряду с вышеуказанным методом оценки потенциальной опасности производственных процессов применяются также метод *МОРНА* (*Methodology of Quantitative Process Hazard Analysis*) описанный в [5, 6].

Недостатки этих методов связаны со сложностью их применения для анализа комбинаций событий, которые чаще всего являются причиной чрезвычайной ситуации [7]. Метод Монте-Карло (метод статистического моделирования) позволяет решать вероятностные проблемы статистическими средствами (с помощью случайных чисел). Существенным недостатком метода является то, что повышение точности расчета на один порядок приводит к увеличению расчета на два порядка. Другая изюминка способа – его применение, обычно, тем эффективнее, чем выше вычислительные способности компьютера.

Метод потенциальных отклонений [8] применяется для анализа опасности и аварийности технических систем. Как недостаток данного метода можно отметить достаточно субъективную процедуру выбора ключевых слов для характеристики отклонений. Однако эта методика имеет ряд недостатков [9, 10]:

- возможность применения ее в полном объеме только для опасностей первого класса и частично для объектов второго класса;
- не уделяется внимание определению внешних факторов инициирования аварии, таких как вероятность возникновения аварии на соседнем объекте;
- процесс анализа опасностей, описанный в методике, не учитывает возможное негативное влияние человека на безопасную эксплуатацию объекта контроля;
- отсутствуют математические выражения для определения требуемых показателей.

Как недостаток данной методики также можно отметить то, что применение методов представленных в ней требует серьезного программного обеспечения, высоко подготовленных специалистов и значительных затрат времени. Также данный метод не учитывает негативные факторы внешнего воздействия на техническую систему и влияние человека, рассматривая только опасности технического характера, возникающие при эксплуатации внутри системы.

В России для оценки потенциальной опасности производственных процессов применяют «Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов» [11]. Но проведение такой методики требует значительных затрат в ресурсе и времени. Также как недостаток можно отметить, что процесс анализа опасностей, описанный в методике, не учитывает возможное негативное влияние человека на безопасную эксплуатацию объекта контроля. Таким образом, не решенной частью проблемы является отсутствие четко сформулированной и эффективной комплексной процедуры оценки состояния безопасности

потенциально опасных объектов, которая учитывала бы надежность технических систем и факторы, оказывающие основное негативное влияние на такие объекты, а также их взаимосвязи.

Методология. Целью работы является разработка нового подхода к количественной оценке потенциальной опасности производственных процессов для возможности принятия управленческих решений по предупреждению чрезвычайных ситуаций. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- теоретически обосновать подход к количественной оценке потенциальной опасности производственных процессов с учетом природы основных отрицательных влияний факторов опасности на функционирование объекта и взаимосвязей между ними;

- проверить работоспособность предложенного подхода к количественной оценке потенциальной опасности производственных процессов на примере химически опасного объекта.

Методология исследования имеет комплексный междисциплинарный характер и опирается, во-первых на общую методологию обобщения, систематизации и анализа научных и исследовательских данных в сфере стандартов безопасности на предприятиях, во-вторых на методологический императив экспликации научно-теоретического содержания в процессах по освоению принципов оценки потенциальной опасности производственных процессов [12].

Результаты. Для определения показателей опасности основных элементов производственных процессов по «технической надежности» предлагается исследовать взаимовлияние их отказов и применить теорию вероятности логических схем. Так, по формуле (1) определим показатели опасности p_n основных элементов производственных процессов по «технической надежности», кроме трубопроводов [13].

$$p_n^1 = 1 - \prod_{i=1}^a e^{-\frac{\tau}{\lambda_i}} = 1 - e^{-\sum_{i=1}^a \frac{1}{\lambda_i} \cdot \tau}, \quad (1)$$

где a – количество основных компонентов у соответствующего элемента производственных процессов;

λ_i – наработка на отказ i -того компонента соответствующего элемента производственных процессов [ч];

τ – время работы (эксплуатации) соответствующего элемента производственных процессов [ч].

По формуле (2) определены показатели опасности p_n трубопроводов производственных процессов по «технической надежности».

$$p_n^I = 1 - e^{-\eta_n \tau} \quad (2)$$

где η_n – плотность отказов n -го трубопровода [отк./ед. дл×год],

τ – время эксплуатации трубопровода [ч].

Показатели опасности n -го элемента производственных процессов при осуществлении «воз-

действия субъектом» определены по формуле (3) в зависимости от его чувствительности к действию факторов опасности (ошибки персонала, связанные с отсутствием опыта; ошибки персонала, связанные с профессиональным выгоранием; ошибки персонала, связанные с несовершенством режима труда) и этапа трудовой деятельности, на котором находится оператор установки.

$$p_n^I = \frac{\sum_{i=1}^c \alpha_j}{c}, \quad (3)$$

где c – количество факторов опасности, к действию которых чувствителен n -ый элемент производственных процессов и влияет на оператора на соответствующем этапе его трудовой деятельности;

α_j – показатель чувствительности персонала к действию j -го фактора опасности.

$$\alpha_j = \varphi_k \cdot \frac{\sum_{i=1}^z \alpha_{j, \text{norm}, \text{max}}^i}{z} \cdot e, \quad (4)$$

где z – количество психогенных факторов j -го фактора опасности;

φ_k – коэффициент изменения чувствительности;

$\alpha_{j, \text{norm}, \text{max}}^i$ – нормированные максимальные значения чувствительности к действию психогенного фактора;

e – интенсивность возникновения ошибок оператора.

Оценка опасности при действии опасных факторов «внешнего воздействия» на производственный процесс проведена путем применения методов экспертных оценок и законов распределения случайных величин. Показатели опасности n -го элемента производственных процессов при действии «внешнего воздействия» определим по формуле:

$$p_n^{III} = \sum_{j=1}^c w_n^{-j} \cdot (1 - e^{-\eta_j \tau}), \quad (5)$$

где c – количество факторов опасности, действующих на n -ый элемент производственных процессов (обесточивание в результате внешнего воздействия; прекращение водоснабжения в систему охлаждения в результате внешнего воздействия; разгерметизация элементов установки в результате внешнего воздействия; террористический акт);

τ – время эксплуатации элементов производственных процессов;

η_j – плотность событий, провоцирующих возникновение j -го фактора опасности;

w_n^{-j} – среднее значение коэффициента действия j -го фактора опасности на n -ый элемент определяется по формуле:

$$w_n^{-j} = \frac{\sum_{i=1}^c w_n^{i,j}}{c} \quad (6)$$

где c – количество экспертов;

$w_n^{i,j}$ – коэффициент действия j -го фактора опасности на n -ый элемент, который определил i -ый эксперт.

Интегрированные показатели опасности P_n основных элементов производственных процессов определим с помощью зависимости:

$$P_n = \sqrt{(p_n^I)^2 + (p_n^{II})^2 + (p_n^{III})^2} \quad (7)$$

где p_n^I , p_n^{II} , p_n^{III} – нормированные значения

показателей опасности элементов производственных процессов при действии факторов опасности разной природы:

$$p_n^{-m} = \frac{p_n^m}{p_n^I + p_n^{II} + p_n^{III}} \quad (8)$$

где m – показатель природы фактора опасности (I – по «технической надежности», II – при «влиянии субъекта», III – при «внешнем влиянии»).

Определение необходимости осуществления управленческих мер по повышению уровня безопасности производственных процессов заключается в сравнении фактических интегрированных показателей опасности его элементов P_n , полученных с помощью предложенного подхода, с аналогичными показателями P_n^{ctam} , которые получены статистическим путем посредством анализа аварий и аварийных ситуаций, возникающих на производственных процессах [14-17].

Если выполняется равенство $P_n^{\text{ctam}} \leq P_n$, то безопасность соответствующего элемента находится на уровне, достаточном для безаварийной эксплуатации объекта контроля, если равенство не выполняется, то уровень безопасности соответствующего элемента необходимо повышать [18-21].

Обсуждение. Было определено, что показатели опасности производственных процессов конкретного предприятия по «технической надежности» за первые 10 лет находится в диапазоне варьирования от 0 до 0,7. Значение показателей опасности элементов группы II резко уменьшается уже в первые 3 года эксплуатации. Это говорит о том, что из-за более сложной конструкции и более высокой интенсивности износа, чем у элементов группы I в течение относительно короткого промежутка времени, их надежность резко падает.

Группа элементов объекта исследования I не чувствительна к воздействию факторов опасности при осуществлении «воздействия субъектом», значение их показателей опасности находится на отметке 0. Динамика изменения значений показателей опасности группы элементов объекта исследования II в выбранном интервале времени варьирует в диапазоне от 0 до 0,85 и показывает высокую чувствительность к действию факторов опасности этой природы. Значения показателей опасности группы элементов объекта исследования III и IV за первый год эксплуатации уменьшаются в диапазонах от 0,4 до 0,15 и от 0,6 до 0,25 соответственно, в период от 1 до 6,5 лет их значения остаются не переменными, а после указанного периода приобретают тенденции к увеличению.

Показатели опасности производственных процессов предприятия при действии факторов опасности «внешнего воздействия» за первые 10 лет находится в диапазоне варьирования от 0 до 0,2. Это говорит о низкой чувствительности объекта контроля в этот период к действию указанных факторов опасности. Таким образом, в работе сделана попытка исправить общие недостатки большинства концепций

мониторинга производственных процессов, а именно отсутствие системности и комплексного подхода. Ведь в исследовании учтен тот факт, что опасные факторы, оказывающие основное негативное влияние на производственные процессы, находятся в тесной взаимосвязи друг с другом, в ходе этого взаимодействия возникает результирующий комплекс угроз, не являющийся простой их совокупностью. Исходя из этого, обеспечить эффективное противодействие существующим и потенциальным факторам опасности можно только учитывая особенности каждого из них, а также специфику их возникновения, что предлагается в данной работе.

Предлагаемый подход к количественной оценке состояния безопасности производственных процессов составляет практическую ценность с точки зрения трех сторон: руководителя объекта, так как он заинтересован в безаварийной работе объекта в течение как можно более длительного времени; государственных органов надзора, в функциональные обязанности которых входят проверки состояния безопасности таких объектов и страховых компаний для разработки эффективных бизнеспроектов. Для государственных органов надзора подход составляет ценность как предмет анализа фактического состояния опасности объекта контроля, результаты которого являются основой для принятия решений по применению соответствующих санкций. Для страховых компаний – как предмет определения возможности возникновения чрезвычайных ситуаций на рассматриваемом объекте и основания для определения размеров стоимости страховых полисов и выплат при возмещении материального ущерба. Для руководителя организации практическую ценность результаты исследования составляют как предмет помощи в принятии управленческих решений, связанных с разработкой стратегии безопасности на объекте контроля.

Выводы. Теоретически обоснован подход к количественной оценке состояния безопасности производственных процессов, который учитывает надежность технических систем объекта контроля, влияние субъекта (человеческий фактор) и влияние внешних факторов опасности на производственные процессы. Подход включает: определение природы основных отрицательных влияний факторов опасности на функционирование производственных процессов, таких как блок показателей технической надежности P'_n , блок показателей влияния субъекта P''_n и блок показателей опасности внешнего воздействия P'''_n ; количественную оценку факторов опасности разной природы на функционирование ПОО на основе интегрированных показателей опасности P_n ; анализ необходимости осуществления управленческих мероприятий с повышением уровня безопасности производственных процессов, который состоит в сравнении фактических интегрированных показателей опасности его элементов P_n , полученных при помощи предложенного подхода, с

аналогичными показателями P_n^{stat} , который получен статистическим путем при помощи анализа аварий и аварийных ситуаций, которые возникали на ПОО.

Проверена работоспособность предлагаемого подхода к количественной оценке состояния безопасности производственных процессов на примере предприятия. Определение уровня безопасности (мониторинг потенциальной опасности) на исследуемом объекте проводилось с помощью ПТК мониторинга и управления безопасностью производственных процессов. Мониторинг показал, что показатели опасности объекта за все время эксплуатации находятся в диапазоне варьирования: по технической надежности – от 0 до 0,7; при осуществлении «воздействия субъектом» – от 0 до 0,85; при действии факторов опасности «внешнего воздействия» – от 0 до 0,2. Полученные данные позволили проверить адекватные теоретические исследования относительно количественной оценки потенциальной опасности производственных процессов. Дальнейшие исследования планируется посвятить разработке механизмов управления техногенной безопасностью производственных процессов на основе данных, полученных посредством применения предложенного подхода к количественной оценке состояния безопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Шур П.З., Зайцева Н.В., Фокин В.А., Редько С.В. Методические подходы к оценке профессионального риска здоровью, обусловленного воздействием шума на уровне 80-85 дБА. Гигиена и санитария. – 2020. – Т.99. – № 8. – С. 866-870.
2. Спирин В.Ф., Старшов А.М. К некоторым проблемам хронического воздействия производственного шума на организм работающих (обзор литературы) // Анализ риска здоровью. – 2021. – №1. – С. 186-193.
3. Шендакова Т.А., Гаврилова Т.Г. Управление профессиональным риском работников животноводства // Сб. материалов Всероссийской научной конференции «Техносферная безопасность в АПК». – 2018. – С. 117-126.
4. Черный К.А., Файнбург Г.З., Розенфельд Е.А. Методологические проблемы проведения оценки профессиональных рисков на горнорудных предприятиях и их решение // Недропользование. – Т. 21. – №4. – 2021. – С. 193-200.
5. Воробинская Л.И., Финоченко В.А., Финоченко Т.А. Специальная оценка условий труда как информационная база для внедрения риск-ориентированного подхода в сфере охраны труда // Труды РГУПС. Ростов н/Д: №2(51), – 2020. – С. 18-22.
6. ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011. «Менеджмент риска. Методы оценки риска». 01.12.2012. М., 2012.
7. Картвелишвили В.М., Свиридова О.А. Риск-менеджмент. Методы оценки риска: учебное пособие. М.: ФГБОУ ВО «РЭУ им. Г. В. Плеханова», 2017. – 120 с.
8. Международный стандарт ISO 31010:2009. Риск-менеджмент – Принципы и руководства. 15.11.2009. М., 2019.
9. Иванов Ю.М. Анализ травматизма работников, обусловленного трудовым стажем. Оценка рисков травматизма / Ю.М. Иванов, Н.В. Куракина, А.И. Фомин и др. Уголь. – 2022. – № 2. – С. 37-40. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-2-37-40.
10. Солодов А.К. Основы финансового риск-менеджмента. М.: Издание Александра К. Солодова. – 2017. – 286 с.
11. Кантор О.Г. Классификация методов количественной оценки экономического риска // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета.

– 2013. – Т.17. – №7(60). – С. 34-39.

12. Шиянов Б.А., Силютин О.В., Неженец В.С. Вероятностно-статистические методы количественной оценки рисков в системе регулирования неравновесными состояниями экономических систем // Вестник Воронежского государственного технического университета. – № 8. – 2010. – С. 164-170.

13. Белов О.А., Марченко А.А., Труднев С.Ю. Анализ расчетно-аналитических методов прикладных задач технической безопасности // Вестник Астраханского государственного университета. Серия: Морская техника и технология. – № 4. – 2015. – С. 7-15.

14. Феоктистова О.Г., Туркин И.К., Баринев С.В. Актуальность оценки производственного риска на авиапредприятиях // Научный вестник Московского технического университета гражданской авиации. – Т.20. – №4. – 2017. – С. 162-175.

15. Елин А.М., Ротфельд М.В., Тимашов А.В. О перспективах метода комплексной оценки профессионального риска при планировании трудовых мероприятий // Энергобезопасность и энергосбережение. – №4. – 2011. – С. 3-8.

16. Воробинская Л.И., Финоченко В.А. Особенности оценки и управления профессиональными рисками // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – Вып. 11. – С. 253-259.

17. Сподых Г.Г. Систематизация методов идентификации, анализа и оценки рисков // Вестник Астраханского технического университета. – 2021. – №2. – С. 31-37.

18. Алекина, Е.В., Мельникова, Д.А., Яговкин, Г.Н. Теоретические основы формирования интегративной системы управления безопасностью производства. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2017. – 281 с.

19. Кривов М.В. Система выработки стратегий управления промышленной безопасностью // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2022. – № 59. – С. 55-65.

20. Махутов Н.А. Задачи разработки и реализации системы управления промышленной безопасностью предприятия при эксплуатации технических устройств // Безопасность руда в промышленности. – 2021. – № 2. – С. 15-19.

21. Левкина Е.В. Экономическая безопасность предприятия. Владивосток. 2022. – 159 с.

Статья поступила в редакцию 07.02.2024

Статья принята к публикации 15.03.2024

УДК: 574.63

EDN: WIBVSY

**УДАЛЕНИЕ ЧАСТИЦ МИКРОПЛАСТИКА ИЗ ПРИРОДНЫХ ВОД Г. САНКТ-ПЕТЕРБУРГА И
ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ С ПОМОЩЬЮ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ *CHLORELLA KESSLERI***

© Авторы 2024

SPIN: 1450-4720

AuthorID: 1134326

БОНДАРЕНКО Кристина Александровна, магистрант Высшей школы техносферной безопасности

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

(Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, e-mail: metsheryakova.ka@edu.spbstu.ru)

SPIN: 2090-0321

AuthorID: 1013155

ORCID: 0000-0002-8710-6304

ScopusID: 57373325600

ЗИБАРЕВ Никита Васильевич, ассистент Высшей школы биотехнологий и пищевых производств

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

(Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, e-mail: zibarev_nv@spbstu.ru)

SPIN: 1159-95606

AuthorID: 109785

ORCID: 0000-0002-7151-5998

ScopusID: 56225536000

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)

ПУГАЧЕВА Дарья Алексеевна, магистрант Высшей школы техносферной безопасности

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

(Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, e-mail: darya.pugacheva.2014@mail.ru)

SPIN: 8802-2617

AuthorID: 699452

БЕЛОУСОВА Вита Юрьевна, кандидат технических наук,

доцент Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

(Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, e-mail: belousova_vyu@spbstu.ru)

Аннотация. Статья посвящена проведению исследований по удалению частиц микропластика в пробах природных вод г. Санкт-Петербурга и Ленинградской области с помощью микроводорослей *Chlorella kessleri*. В работе рассмотрены основные существующие технологии удаления микропластика в мире. Отбор проб для проведения исследования производился в пяти точках города и области, обусловленных постоянным поверхностным течением и наличием рядом очистных сооружений разной производительности. Методом микроскопирования были выявлены частицы микропластика размером от 70 мкм до 165 мкм различных форм и цветов. Были выявлены наиболее загрязненные водные объекты с высоким содержанием частиц микропластика. Для удаления частиц микропластика использовали штамм одноклеточной микроводоросли *Chlorella kessleri*. Полученные в работе результаты свидетельствуют о наличии процесса гетероагрегации штаммом одноклеточной микроводоросли *C. kessleri* с частицами микропластика. Применение микроводорослей для удаления частиц показало, что при данном способе происходит процесс гетероагрегации, и одновременно с этим процессом наблюдается ингибирование роста микроводорослей. В аналогичных исследованиях нет данных об однозначной эффективности применения микроводорослей для удаления частиц микропластика. Поэтому, необходимо провести дальнейшие исследования, в котором стоит выяснить вопрос соизмеримости создания агрегации микропластика меньшего и большего размера.

Ключевые слова: микропластик, микроводоросли, удаление, концентрация, *Chlorella kessleri*, очистка, скорость роста, клетки, гетероагрегация.

**REMOVAL OF MICROPLASTIC PARTICLES IN NATURAL WATER SAMPLES ST. PETERSBURG
AND LENINGRAD REGION WITH THE HELP MICROALGAE *CHLORELLA KESSLERI***

© The Authors 2024

BONDARENKO Kristina Aleksandrovna, master's student at the Higher School of Technosphere Safety

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

(Russia, 195251, St. Petersburg, st. Politekhnikeskaya, 29, e-mail: metsheryakova.ka@edu.spbstu.ru)

ZIBAREV Nikita Vasilyevich, assistant at the Higher School of Biotechnology and Food Production

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

(Russia, 195251, St. Petersburg, st. Politekhnikeskaya, 29, e-mail: zibarev_nv@spbstu.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. Politekhnikeskaya, 29, e-mail: politaevana1971@gmail.com)

PUGACHEVA Darya Alekseevna, master's student at the Higher School of Technosphere Safety

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

(Russia, 195251, St. Petersburg, st. Politekhnikeskaya, 29, e-mail: darya.pugacheva.2014@mail.ru)

BELOUSOVA Vita Yuryevna, candidate of technical sciences, associate professor

of the Higher School of Hydraulic and Energy Engineering

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

(Russia, 195251, St. Petersburg, st. Politekhnikeskaya, 29, e-mail: belousova_vyu@spbstu.ru)

Abstract. The article is devoted to conducting a study on the removal of microplastic particles in samples of natural waters of St. Petersburg and the Leningrad region using microalgae *Chlorella kessleri*. The paper considers the main existing technologies for removing microplastics in the world. Sampling for the study was carried out in five points of the city and the region, due to the constant surface flow and the presence of a number of treatment plants of different capacities. Microscopy revealed microplastic particles ranging in size from 70 microns to 165 microns in various shapes and colors. Of the five samples studied, two of the most contaminated samples were identified, where the most microplastic particles were found. A strain of unicellular algae was used to remove microplastic particles. The results obtained in this work indicate the presence of a process of heteroaggregation by a strain of unicellular microalgae *C. kessleri* with microplastic particles. The use of microalgae to remove particles has shown that with this method, the process of formation of heteroaggregation occurs, and simultaneously with this process, growth inhibition is observed. In similar studies, there is no data on the unambiguous effectiveness of using microalgae to remove microplastic particles. Therefore, it is necessary to conduct further research, in which it is necessary to clarify the issue of the commensurability of creating an aggregation of microplastics of smaller and larger sizes.

Keywords: microplastics, microalgae, removal, concentration, *Chlorella kessleri*, purification, growth rate, cells, heteroaggregation.

Для цитирования: Бондаренко К.А. Удаление частиц микропластика из природных вод г. Санкт-Петербурга и Ленинградской области с помощью микроводорослей *Chlorella Kessleri* / К.А. Бондаренко, Н.В. Зибарев, Н.А. Политаева, Д.А. Пугачева, В.Ю. Белоусова// XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 1(65). – С. 218-226. – EDN: WIBVSY.

Введение. Вода – один из самых необходимых ресурсов для жизни на Земле, и ее качество имеет огромное значение для поддержания здоровья и благополучия всего живого. Однако современные проблемы загрязнения окружающей среды привлекают все больше внимания научного сообщества, а особенно в водах наличие микропластика. Производство и использование пластмасс стремительно растет с 1950-х годов благодаря превосходным свойствам, таким как низкая стоимость, универсальность и долговечность. Широкое использование пластмассовых изделий привело к образованию большого количества пластиковых отходов. Недавние результаты моделирования предсказывают, что объем пластиковых отходов в мире утроится до 270 миллионов тонн в период с 2015 по 2060 год [1].

Пластиковые отходы, несомненно, усугубляют загрязнение окружающей среды (далее – ОС) [2-3]. Попадая в ОС, пластиковые отходы постоянно распадаются на мелкие фрагменты и частицы [4]. Удаление микро- и наноразмерных частиц пластика из окружающей среды является более сложной задачей, чем удаление крупного пластикового мусора. Микропластик – это синтетические высокомолекулярные соединения, микронизирован-

ные до пластиковых частиц размером менее 5 мм, образующиеся в результате разложения крупных пластиковых отходов. Микропластик можно классифицировать по источнику происхождения и размеру фрагментов. Микропластик можно разделить на первичный и вторичный. Первичный микропластик – пластиковые частицы, входящие в состав потребительских товаров (например, моющие средства и косметика). Вторичный микропластик – это мелкие частицы, образующиеся в результате износа, а также разрушения крупного пластикового мусора (т.е. разложившиеся пластиковые упаковки, бутылки и другие пластиковые изделия на мелкие фрагменты вследствие длительного воздействия солнечного света и других механических процессов) [5-6].

С тех пор как в 2004 году было введено понятие «микропластик» (далее – МП), [7] он был обнаружен в различных средах окружающей среды и организмах по всему миру [8-11]. До настоящего времени сообщалось о загрязнении микропластиком более чем 690 морскими видами (зоопланктон, двусторчатые моллюсков, десятиногих ракообразных, рыб, морских млекопитающих) [12-13]. Многочисленные эксперименты продемонст-

рировали токсические эффекты микропластика у перечисленных морских видов, как ингибирование роста, окислительное повреждение и иммунный стресс [14-15]. Частицы микропластика также могут накапливаться в морских организмах и передаваться по пищевой цепи на более высокие трофические уровни, включая человека [16].

Совсем недавно угроза МП для здоровья человека привлекла серьезное внимание из-за широко распространенного обнаружения МП в продуктах питания и окружающей среде, связанных с человеком, таких как мед [17], молоко [18], пиво [19], морепродукты [20], поваренная соль [21-22], питьевая вода [23] и воздух [24]. Потребление некоторых пищевых продуктов, таких как морепродукты, мед и пиво, можно намеренно свести к минимуму или вовсе избежать, но воздействие загрязненной микропластиком поваренной соли, питьевой воды и воздуха неизбежно [25]. Несмотря на небольшое ежедневное потребление соли, содержание МП в соли значительно в некоторых регионах, например, в Хорватии потребление соли составляет почти $11 \text{ г} \cdot \text{сут}^{-1}$ на человека и Италии $8 \text{ г} \cdot \text{сут}^{-1}$, соответственно [26]. Кроме того, фактическое потребление соли может быть намного выше (например, $10 \text{ г} \cdot \text{сут}^{-1}$ во всем мире и $18 \text{ г} \cdot \text{сут}^{-1}$ в Турции), чем рекомендуемый Всемирной организацией здравоохранения порог потребления в $5 \text{ г} \cdot \text{сут}^{-1}$ [27-28]. Микропластик, содержащийся в поваренной соли и питьевой воде, может попадать в организм человека через пищеварительный тракт, в то время как МП, содержащийся в воздухе, может вызывать воздействие как на пищеварительную, так и на дыхательную системы. Взвешенный в воздухе микропластик может вдыхаться, а отложившийся МП может попадать внутрь при контакте из рук в рот, особенно у детей [29].

В настоящее время разработано множество технологий удаления микропластика, включая физические, химические и биологические подходы. Основные применяемые методы удаления микропластика в мире: микрофильтрация, флотация, коагуляция и экстракция [30]. Авторами было исследовано удаление микропластика методами сорбции и фильтрацией [6]. Технология фильтрации направлена на применение фильтров различной пористости для удаления микропластика из воды. Данная технология имеет преимущества и недостатки. Технология обладает высокой эффективностью удаления, но и в то же время относительно высокой стоимостью из-за загрязнения фильтрующих мембран и замен их на новые. Подход адсорбции и магнитной сепарации является простым методом удаления, однако добавки сорбентов могут вызывать вторичное загрязнение [31]. При применении адсорбции для удаления микропластика могут быть использованы химически синтезированные губчатые, графеновые и биоугольные материалы. Для контроля микропластика разработаны различные методы, большинство

из которых находятся на лабораторной стадии [32-33]. Для удаления микропластика из воды используют коагуляцию, адсорбцию, магнитную сепарацию, мембранную фильтрацию и электрокоагуляцию [34-36]. Авторы [36] сообщили об использовании динамических мембран для эффективного удаления микропластика из сточных вод. Было выявлено, что сочетание пористых мембран с биологическими процессами может повысить эффективность удаления частиц микропластика до 99,9%.

О способности гигантского моллюска Красного моря *Tridacna maxima* удалять полиэтиленовый микропластик размером 53-500 мкм из сточных вод сообщили [37]. Их результаты показали ключевую роль раковин моллюсков в удалении микропластика путем сорбции. Авторы предположили, что эта морская биота может быть использована для быстрого удаления микропластика с водных поверхностей в регионах с низкой концентрацией микропластика, что было частично продемонстрировано предыдущими исследователями [38]. В недавнем проведенном исследовании [39] было обнаружено, что водоросли способны быстро адсорбировать частицы микропластика, а также образовывать гетерогенные агрегаты, снижая концентрацию микропластика в воде. Одним из проведенных исследований является высокоэффективное удаление нескольких видов микропластика: полистирола, полиметилметакрилата и полилактида микроводорослями *Scenedesmus abundans*, а основной механизм удаления МП идентифицирован как гетероагрегация. Точная количественная оценка эффективности удаления была достигнута путем количественного определения свободных взвешенных микрочастиц до и после обработки микроводорослями, а общая эффективность удаления составила 84% для всего микропластика. Среди этого микропластика водоросли *S. abundans* показали высокую эффективность удаления микрочастиц полиметилметакрилата $\eta=98\%$. Для двух других видов МП общая эффективность удаления составила более 70% [40].

Целью данной работы являлось удаление частиц микропластика в пробах природных вод Санкт-Петербурга и Ленинградской области с помощью микроводорослей *Chlorella kessleri*.

Методология. Пробы воды отбирались в пяти контрольных створах (рис. 1):

Проба №1. г. Санкт-Петербург, Красносельский район, Жемчужный пляж Финского залива.

Проба №2. г. Санкт-Петербург, Красносельский район, Дудергофский канал.

Проба №3. г. Санкт-Петербург, Красносельский район, Матисов канал.

Проба №4. г. Санкт-Петербург, Петроградский район, Кронверкский пролив р. Невы.

Проба №5. Ленинградская область, г. Отрадное, р. Нева.

Кружки с числами на рисунке 1 соответствуют точкам отбора проб.

Выбор мест отбора проб был связан со следующими условиями: точки 1, 2, 3 находятся в пляжном рекреационном районе. Так же, в этом месте проходит постоянное поверхностное течение Балтийского моря (рис. 2). Точка 5 и 4 – на Неве,

выше и ниже по её течению, соответственно. На берегах Невы имеются очистные сооружения разной производительности и качественного состава сточных вод. Поэтому было важно рассмотреть наличие микропластика в указанных точках.

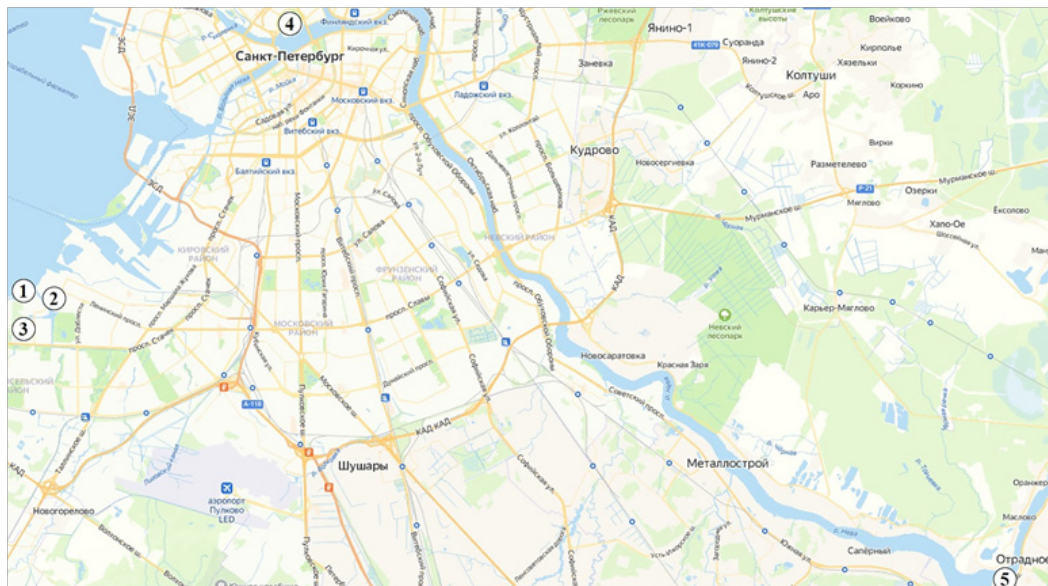


Рисунок 1 – Картосхема территории отбора проб в г. Санкт-Петербурге и Ленинградской области

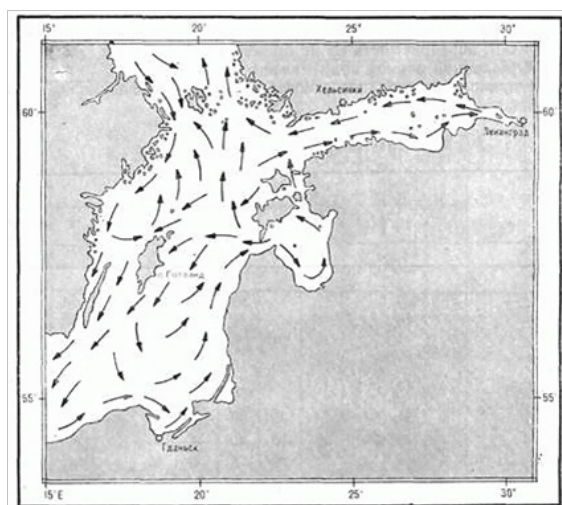


Рисунок 2 – Схема постоянных поверхностных течений

Для проведения анализа содержания микропластика в пробах природных вод необходима пробоподготовка. Сотрудниками Института озера-ведения РАН [41] была разработана методика исследования содержания частиц микропластика в воде, она была адаптирована и применена для данного исследования.

Методику обработки проб для выявления микропластика можно разделить на четыре основных этапа.

1. На первом этапе производилось плотностное разделение микропластика воды и донных отложений при помощи хлорида цинка $ZnCl_2$. Этап осуществлялся путем взмучивания проб при помощи перемешивания воды и донных отложе-

ний с раствором $ZnCl_2$, после чего пробы отстаивались около часа для оседания на дно плотных минеральных частиц. Для приготовления 55%-ого раствора $ZnCl_2$, на лабораторных весах марки *Detsom-DL213* было взвешено 165 граммов хлорида цинка и смешано с 300 мл воды, после чего раствор был профильтрован через металлический фильтр (ячейки фильтра 100 мкм). Частицы микропластика, которые остались на металлическом фильтре, смывались дистиллированной водой в стеклянный стакан для дальнейшего растворения биоматериала.

2. Вторым этапом являлось перекисное окисление проб воды и донных отложений в 30%-ом растворе пероксида водорода для растворения биологического материала. В соотношении 1:1 полу-

ченный раствор добавлялся в стеклянный стакан со смывом, после чего содержимое отправлялось в термостат для нагрева на водяной бане (75°) до растворения органики в течение 45 мин. Далее раствор был профильтрован через металлический фильтр, после чего остатки частиц микропластика и крупных фрагментов были удалены при помощи пинцета, а оставшиеся частицы с фильтра были смыты дистиллированной водой в чаши Петри.

3. Третий этап – это процесс полного высушивания проб на чашках Петри в течение 2-3 суток.

4. Четвертый этап – визуальный анализ полученных образцов при помощи оптического микроскопа Микмед-5 (Россия), работающего в проходящем свете, при полезном увеличении – 400. Микрофотографии получали с помощью видеоокуляра *TourCam* с разрешением 2592x1944 пикселей.

Для удаления частиц микропластика использовали штамм одноклеточной зеленой микроводоросли *Chlorella kessleri* ВКПМ *AI-11 ARW* (далее – *C. kessleri*). Для работы брали концентрированную суспензию микроводорослей с концентрацией 200 млн клеток/мл и разбавляли ее питательной средой [42] до концентрации 21 млн. клеток/мл. После че-

го, смешивали полученную суспензию с неочищенной природной водой в следующем процентном соотношении: $B:X$ 70:30; 30:70: где B – неочищенная природная вода, X – суспензия хлореллы. Для дальнейшего понимания введем обозначения воды: концентрированная (в соотношении $X:70\%$ 210 мл и $B:30\%$ 90 мл) и неконцентрированная (в соотношении $B:70\%$ 210 мл и $X:30\%$ 90 мл).

Культивирование – очистку воды от микропластика проводили в стеклянных фотобиореакторах объемом 1 л (рис. 3). Аэрацию проводили воздухом с помощью аэратора *Xilong AP-003* (Китай), с интенсивностью аэрации – 2.5 л/мин., в качестве источника освещения использовали лампы дневного света с интенсивностью освещения 2500 ± 300 Лк (37.5 мкмол/м²/с). Измеряли скорость роста микроводорослей с помощью спектрофотометра ПЭ-5400 УФ (Россия) при $\lambda = 750$ нм, $l = 5$ см и камеры Горяева. Для выявления мертвых клеток каждый образец жидкой культуры перед подсчетом окрашивали 1%-м раствором метиленового синего. Измеряли pH среды с помощью иономера И-160МИ (Россия) лабораторного. Измерения проводили каждые сутки. Продолжительность эксперимента составила 7 суток.



Рисунок 3 – Стеклянные фотобиореакторы с культурой микроводорослей

Результаты. Во время микроскопирования, был обнаружен микропластик различных форм, цветов и размеров, представленных на рисунке 4.

При микроскопировании пяти отобранных проб, были выявлены две наиболее загрязненные пробы с наибольшим количеством частиц микропластика (пробы №3, 4). На рисунке 5. представлены частицы микропластика из пробы №3, отобранной в Матисовом канале. Аналогичный результат наблюдался и в пробе №4, отобранной в Кронверкском проливе (рисунок не представлен). Для дальнейшего удаления частиц микропластика были взяты пробы №3 и 4.

На графике (рис. 6), в пробе №3, в концентрированной воде наблюдается максимальное число клеток микроводорослей в первые сутки, а на вторые сутки происходит их резкое снижение до 26 клеток млн/мл. При дальнейшем наблюдении численность клеток продолжала снижаться. На пятые сутки произошла гибель культуры, о чем свидетельствуют отсутствие роста и изменение цвета суспензии с зеленого на прозрачный с выпадением коричневого осадка. В неконцентрированной воде наблюдалось две фазы

роста (лаг-фаза: 0-1 сутки и экспоненциальная: 1-3 сутки), стационарная фаза роста отсутствовала. После экспоненциальной фазы рост культуры прекратился на 4 сутки. Контроль соответствует стандартной кривой роста микроорганизмов.

На графике (рис. 7), в пробе №4, в концентрированной воде наблюдается максимальное число клеток в первые сутки, а на вторые сутки происходит их резкое снижение до 53 клеток млн/мл. При дальнейшем наблюдении численность клеток продолжала снижаться. На седьмые сутки произошла гибель культуры, о чем свидетельствуют отсутствие роста и изменение цвета суспензии с зеленого на прозрачный с выпадением коричневого осадка. Однако, в неконцентрированной воде наблюдался постоянный рост культуры на протяжении всего эксперимента. Максимальное число клеток было достигнуто на 7 сутки – 63,5 клеток млн/мл, что свидетельствует об адаптации культуры к среде с содержанием частиц микропластика. Контроль соответствует стандартной кривой роста микроорганизмов.

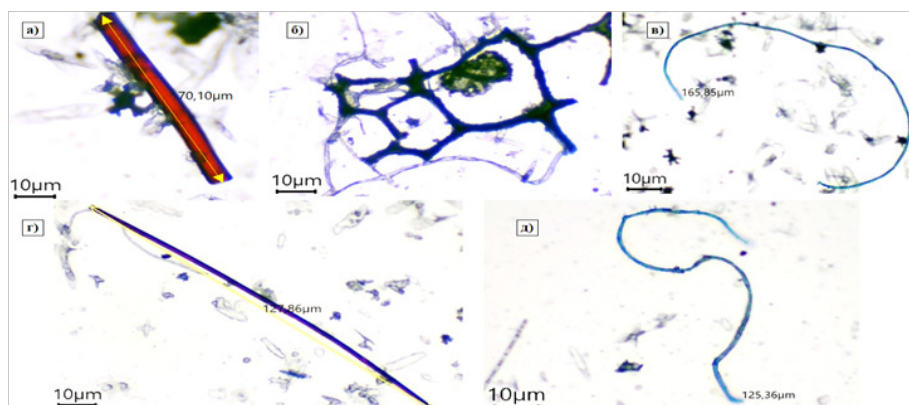


Рисунок 4 – Обнаруженные частицы микропластика в пробах №1-5:
а) нитеобразная частица красного цвета с синим контуром размером 70,1 мкм. в пробе №1; б) фрагмент сеткообразной формы темно-синего цвета в пробе №2, размер фрагмента $\approx 50-100$ мкм; в) частица микропластика синего цвета подковообразной формы в пробе №3; г) нитеобразная частица фиолетового цвета размером 127,86 мкм в пробе №4; д) дугообразная частица синего цвета размером 125,36 мкм. в пробе №5.

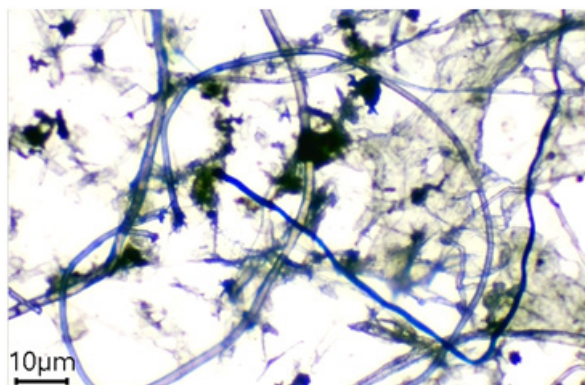


Рисунок 5 – Частицы микропластика, обнаруженные в пробе №3

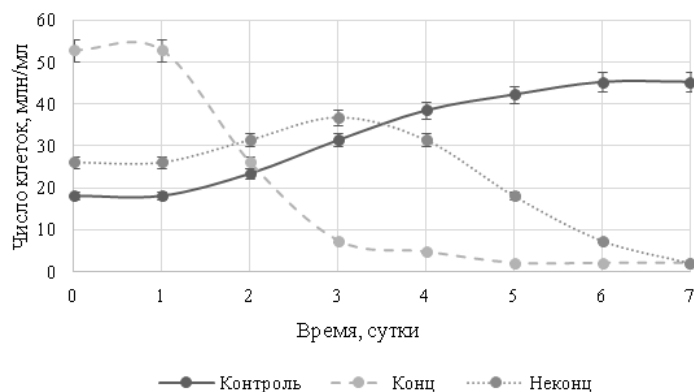


Рисунок 6 – Рост культуры в среде с микропластиком в пробе №3

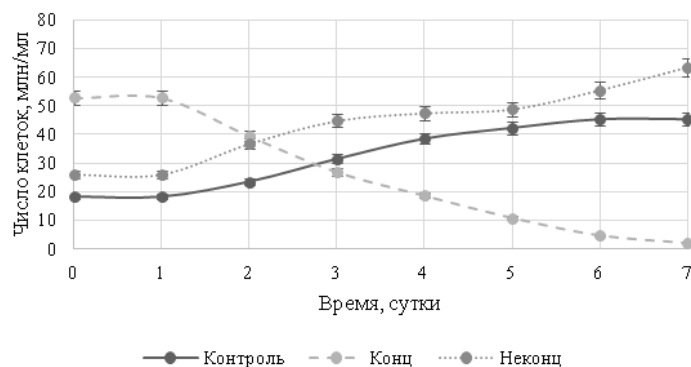


Рисунок 7 – Рост культуры в среде с микропластиком в пробе №4

В таблице 1 представлены результаты подсчета мертвых и живых клеток, выраженных в процентах.

Дальнейшую работу проводили с пробой №4 с неконцентрированной водой. На рисунке 8 наблюдается процесс гетероагрегации микроводорослей

к частице микропластика. Длина частицы микропластика 99,67 мкм.

На рисунке 9 представлена фотография появления агрегатов микроводорослей *C. kessleri* и микропластика в пробе №4 на седьмые сутки.

Таблица 1 – Результаты подсчета мертвых и живых клеток

Наименование и номер пробы	Процент мертвых клеток (%)	Процент живых клеток (%)
Проба №3 (концентрированная)	98%	2%
Проба №3 (неконцентрированная)	95%	5%
Проба №4 (концентрированная)	95%	5%
Проба №4 (неконцентрированная)	10%	90%

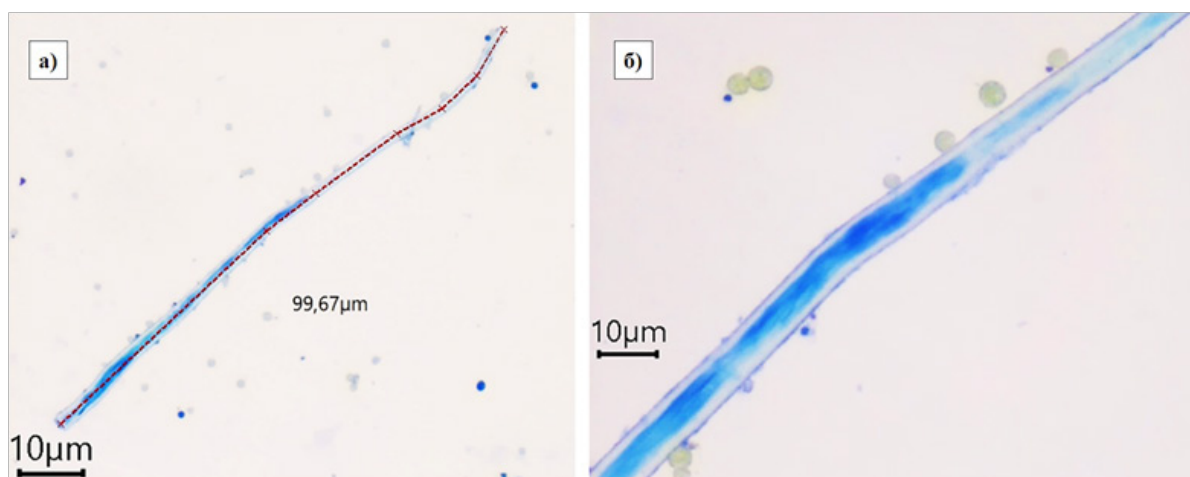


Рисунок 8 – Процесс гетероагрегации водорослей к частице микропластика на седьмые сутки:

а) нитеобразная частица микропластика голубого цвета размером 99,7 мкм (увеличение 10х)

б) приближенная фотография этой же частицы микропластика (увеличение 40х)

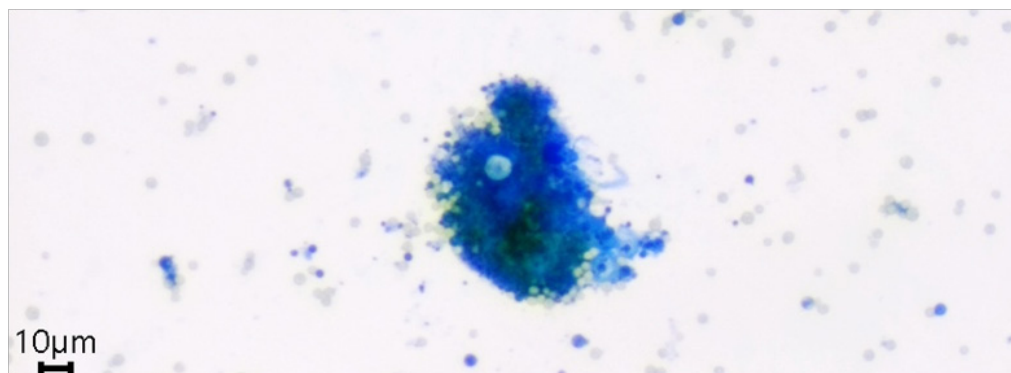


Рисунок 9 – Фотография культуры микроводорослей *C. kessleri* в пробе №4 на седьмые сутки

Обсуждение. Полученные в работе предварительные результаты свидетельствуют о наличии процесса гетероагрегации штаммом одноклеточной микроводоросли *C. kessleri* с частицами микропластика. В отдельных случаях удаление частиц микропластика микроводорослями может иметь эффективность [40].

В полученных выше результатах в пробе №3 (в концентрированной и неконцентрированной водах) происходит ингибирование роста на вторые и четвертые сутки, соответственно. То же явление наблюдается и в пробе №4, а именно – в концентрированной воде, процесс ингибирования

роста происходит на вторые сутки. Данный результат согласуется с исследованием [43], в котором ингибирующий эффект происходит через 96 часов (4 суток) при использовании штамма микроводорослей *Skeletonema costatum* для удаления частиц микропластика размером 1 мкм. В другом исследовании также было обнаружено, что микропластик оказывает ряд неблагоприятных воздействий на микроводоросли, включая ингибирование роста, снижение содержания хлорофилла и фотосинтетической активности, физические и морфологические повреждения, окислительный стресс [44].

В одном из недавних исследований [45], напро-

тив, было выявлено, что концентрация микропластика из поливинилхлорида 50 мг/л улучшает рост микроводорослей и способствует образованию агрегатов. Прекращение роста микроводорослей наблюдалось при более высоких концентрациях микропластика (150 и 200 мг/л), однако агрегация имела тенденцию к увеличению. В проведенном исследовании происходит обратное – улучшение роста культуры микроводорослей в концентрированной воде не наблюдается, а в неконцентрированной воде наблюдается, где процентное соотношение составляет 70:30, в котором 70% – микроводоросли, 30% – вода, содержащая микропластик.

В настоящее время сложно оценить эффективность удаления частиц микропластика в проведенном исследовании. Для повышения эффективности метода, необходимо для начала исследовать вид микропластика, поскольку некоторые виды микропластика оказывают более токсичное воздействие на микроводоросли [43]. Кроме этого, при использовании микроводорослей для удаления частиц микропластика следует учитывать некоторые факторы. Во-первых, для успешного удаления микропластика требуется определенная концентрация микроводорослей в водной среде. Во-вторых, эффективность данного метода может зависеть от вида микроводорослей и условий культивирования. Для дальнейшего исследования необходимо увеличить время проведения эксперимента для выяснения вопроса соизмеримости агрегации микропластика меньшего и большего размера, а также увеличить концентрацию клеток микроводорослей для потенциально большей эффективности.

Выводы. В результате мониторинговых исследований природных вод г. Санкт-Петербурга и Ленинградской области были выявлены частицы микропластика и определен их размер от 70 до 165 мкм. Среди исследуемых проб были выявлены две наиболее загрязненные пробы №3 (отобранная в Матисовом канале) и №4 (в Кронверкском проливе).

Показано, что при применении микроводорослей для удаления частиц микропластика, происходит процесс образования гетероагрегации. Одновременно с этим процессом наблюдалось ингибирование роста.

В аналогичных исследованиях нет данных об однозначной эффективности применения микроводорослей для удаления частиц микропластика. Поэтому, необходимо провести дальнейшие исследования, и стоит выяснить вопрос соизмеримости создания агрегации микропластика меньшего и большего размера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Zhang Q. et al. A review of microplastics in table salt, drinking water, and air: direct human exposure // *Environmental Science & Technology*. – 2020. – Т. 54. – №. 7. – С. 3740-3751.
2. Rochman C.M. et al. Classify plastic waste as hazardous // *Nature*. – 2013. – Т. 494. – №. 7436. – С. 169-171.
3. Wilcox C., Hardesty B.D., Law K.L. Abundance of floating plastic particles is increasing in the Western North Atlantic Ocean // *Environmental science & technology*. – 2019. – Т. 54. – №. 2. – С. 790-796.
4. Chen Q. et al. Pollutants in plastics within the North Pacific subtropical gyre // *Environmental science & technology*. – 2018. – Т. 52. – №. 2. – С. 446-456.
5. Lee Y. et al. Health Effects of Microplastic Exposures: Current Issues and Perspectives in South Korea // *Yonsei Medical Journal*. – 2023. – Т. 64. – №. 5. – С. 301.
6. Padervand M. et al. Removal of microplastics from the environment. A review // *Environmental Chemistry Letters*. – 2020. – Т. 18. – С. 807-828.
7. Thompson R.C. et al. Lost at sea: where is all the plastic? // *Science*. – 2004. – Т. 304. – №. 5672. – С. 838-838.
8. Alimi O.S. et al. Microplastics and nanoplastics in aquatic environments: aggregation, deposition, and enhanced contaminant transport // *Environmental science & technology*. – 2018. – Т. 52. – №. 4. – С. 1704-1724.
9. Wright S.L., Thompson R.C., Galloway T.S. The physical impacts of microplastics on marine organisms: a review // *Environmental pollution*. – 2013. – Т. 178. – С. 483-492.
10. Van Cauwenberghe L. et al. Microplastics are taken up by mussels (*Mytilus edulis*) and lugworms (*Arenicola marina*) living in natural habitats // *Environmental pollution*. – 2015. – Т. 199. – С. 10-17.
11. Li J. et al. Using mussel as a global bioindicator of coastal microplastic pollution // *Environmental pollution*. – 2019. – Т. 244. – С. 522-533.
12. Carbery M., O'Connor W., Palanisami T. Trophic transfer of microplastics and mixed contaminants in the marine food web and implications for human health // *Environment international*. – 2018. – Т. 115. – С. 400-409.
13. Toussaint B. et al. Review of micro- and nanoplastic contamination in the food chain // *Food Additives & Contaminants: Part A*. – 2019. – Т. 36. – №. 5. – С. 639-673.
14. Avio C.G. et al. Pollutants bioavailability and toxicological risk from microplastics to marine mussels // *Environmental pollution*. – 2015. – Т. 198. – С. 211-222.
15. Lu Y. et al. Uptake and accumulation of polystyrene microplastics in zebrafish (*Danio rerio*) and toxic effects in liver // *Environmental science & technology*. – 2016. – Т. 50. – №. 7. – С. 4054-4060.
16. Van Cauwenberghe L. et al. Microplastics are taken up by mussels (*Mytilus edulis*) and lugworms (*Arenicola marina*) living in natural habitats // *Environmental pollution*. – 2015. – Т. 199. – С. 10-17.
17. Liebezeit G., Liebezeit E. Non-pollen particulates in honey and sugar // *Food Additives & Contaminants: Part A*. – 2013. – Т. 30. – №. 12. – С. 2136-2140.
18. Kutralam-Muniasamy G. et al. Branded milks – Are they immune from microplastics contamination? // *Science of the Total Environment*. – 2020. – Т. 714. – С. 136823.
19. Kosuth M., Mason S.A., Wattenberg E.V. Anthropogenic contamination of tap water, beer, and sea salt // *PloS one*. – 2018. – Т. 13. – №. 4. – С. e0194970.
20. Santillo D., Miller K., Johnston P. Microplastics as contaminants in commercially important seafood species // *Integrated environmental assessment and management*. – 2017. – Т. 13. – №. 3. – С. 516-521.
21. Yang D. et al. Microplastic pollution in table salts from China // *Environmental science & technology*. – 2015. – Т. 49. – №. 22. – С. 13622-13627.
22. Peixoto D. et al. Microplastic pollution in commercial salt for human consumption: A review // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. – 2019. – Т. 219. – С. 161-168.
23. Mason S.A., Welch V.G., Neratko J. Synthetic polymer contamination in bottled water // *Frontiers in chemistry*. – 2018. – С. 407.
24. Dris R. et al. Microplastic contamination in an urban area: a case study in Greater Paris // *Environmental Chemistry*. – 2015. – Т. 12. – №. 5. – С. 592-599.
25. Barboza L.G.A. et al. Marine microplastic debris: An emerging issue for food security, food safety and human health // *Marine pollution bulletin*. – 2018. – Т. 133. – С. 336-348.
26. Renzi M., Blašković A. Litter & microplastics features in table salts from marine origin: Italian versus Croatian brands // *Marine pollution bulletin*. – 2018. – Т. 135. – С. 62-68.
27. Erkoyun E. et al. Predicting the health impact of lowering

salt consumption in Turkey using the DYNAMO health impact assessment tool //Public Health. – 2016. – Т. 140. – С. 228-234.

28. Mozaffarian D. et al. Global sodium consumption and death from cardiovascular causes //New England Journal of Medicine. – 2014. – Т. 371. – №. 7. – С. 624-634.

29. Gasperi J. et al. Microplastics in air: are we breathing it in? //Current Opinion in Environmental Science & Health. – 2018. – Т. 1. – С. 1-5.

30. Толкач Г.В. Опыт удаления микропластика из водной среды в Европе и мире. – 2019.

31. Gao W. et al. Removal of microplastics in water: Technology progress and green strategies //Green Analytical Chemistry. – 2022. – С. 100042.

32. Song Y. et al. Biodegradation and disintegration of expanded polystyrene by land snails *Achatina fulica* //Science of the Total Environment. – 2020. – Т. 746. – С. 141289.

33. Uheida A. et al. Visible light photocatalytic degradation of polypropylene microplastics in a continuous water flow system //Journal of hazardous materials. – 2021. – Т. 406. – С. 124299.

34. Wang J. et al. Adsorption and thermal degradation of microplastics from aqueous solutions by Mg/Zn modified magnetic biochars //Journal of hazardous materials. – 2021. – Т. 419. – С. 126486.

35. Shi X. et al. Removal of microplastics from water by magnetic nano-Fe₃O₄ //Science of The Total Environment. – 2022. – Т. 802. – С. 149838.

36. Shen M. et al. Efficient removal of microplastics from wastewater by an electrocoagulation process //Chemical Engineering Journal. – 2022. – Т. 428. – С. 131161.

37. Arossa S. et al. Microplastic removal by Red Sea giant clam (*Tridacna maxima*) //Environmental pollution. – 2019. – Т. 252. – С. 1257-1266.

38. Martí E. et al. Low abundance of plastic fragments in the surface waters of the Red Sea //Frontiers in Marine Science. – 2017. – Т. 4. – С. 333.

39. Liu S. et al. Are algae a promising ecofriendly approach to micro/nanoplastic remediation? //Science of The Total Environment. – 2023. – Т. 904. – С. 166779.

40. Cheng Y.R., Wang H.Y. Highly effective removal of microplastics by microalgae *Scenedesmus abundans* //Chemical Engineering Journal. – 2022. – Т. 435. – С. 135079.

41. Поздняков Ш.Р. и др. Исследование содержания частиц микропластика в воде, донных отложениях и грунтах прибрежной территории Невской губы Финского залива // Водные ресурсы. – 2020. – Т. 47. – №. 4. – С. 411-420.

42. Изменение количества общего азота при биологической очистке сточных вод пивоваренного производства с использованием микроводорослей *Chlorella sorokiniana* / Н.В. Зибарев, Н.А. Политаева, М.Ю. Андрианова, Е.А. Торгаева // Биотехнологии и безопасность в техносфере: Сборник материалов Всероссийской конференции В 2 частях, Санкт-Петербург, 21-22 апреля 2021 года / СПбПУ Петра Великого. Том 1. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2021. – С. 117-119. – EDN VOLPGX.

43. Zhang C. et al. Toxic effects of microplastic on marine microalgae *Skeletonema costatum*: interactions between microplastic and algae //Environmental pollution. – 2017. – Т. 220. – С. 1282-1288.

44. Demir-Yilmaz I. et al. The role of microplastics in microalgae cells aggregation: a study at the molecular scale using atomic force microscopy //Science of the Total Environment. – 2022. – Т. 832. – С. 155036.

45. Manzi H.P., Zhang M., Salama E.S. Extensive investigation and beyond the removal of micro-polyvinyl chloride by microalgae to promote environmental health //Chemosphere. – 2022. – Т. 300. – С. 134530.

Статья поступила в редакцию 10.02.2024

Статья принята к публикации 15.03.2024

УДК 331.45

EDN: XIRDUR

**ПРИМЕНЕНИЕ ЭМПИРИЧЕСКОЙ ФОРМУЛЫ В ОЦЕНКЕ БЕЗОПАСНОСТИ
ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ**

© Автор(ы) 2024

SPIN: 4241-1622,

AuthorID: 848376

ORCID: 0000-0001-7891-1291

ДЕМЕНТЬЕВА Юлия Васильевна, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности и экология»
Самарский государственный университет путей сообщения
(РФ, 443066 г. Самара, ул. Свобода, 2В, yulia_dementyeva@bk.ru)

SPIN: 9243-7382,

AuthorID: 1143692

ORCID: 0000-0002-0185-5671

ТАТАРИНЦЕВ Святослав Дмитриевич, аспирант
кафедры «Безопасность жизнедеятельности и экология»
Самарский государственный университет путей сообщения
(РФ, 443066 г. Самара, ул. Свобода, 2В, sv2030@yandex.ru)

Аннотация. В настоящей статье рассмотрена проблема производственного дорожно-транспортного травматизма на предприятиях железнодорожной отрасли Российской Федерации. Результаты ранее проведенных научных исследований показали, что несчастные случаи, возникающие в условиях дорожно-транспортных происшествий, занимают преобладающую долю в общей динамике производственного травматизма ОАО «РЖД». В этой связи существует необходимость разработки превентивных мероприятий, направленных на снижение рисков возникновения дорожно-транспортных происшествий (далее – ДТП) при эксплуатации работниками ОАО «РЖД» автотранспортных средств. В целях снижения рисков ДТП и повышения безопасности труда водителей на экспериментальные автобусы марки *Ford Transit*, эксплуатируемые в структурных подразделениях Куйбышевской железной дороги – филиала ОАО «РЖД», были установлены бортовые системы мониторинга транспортных средств (далее – БСМТС), способные распознавать и предупреждать опасности в пути следования. Для количественной оценки безопасности дорожного движения (далее – БДД) до и после проведения превентивных мероприятий было предложено применение эмпирической формулы, определяющей соотношение количества административных штрафов, выписанных Государственной инспекцией безопасности дорожного движения (далее – ГИБДД) за нарушения правил дорожного движения (далее – ПДД), к совокупному пробегу экспериментальных автомобилей за один год, приведенных к 1000 километров. Применение предложенной эмпирической формулы позволило оценить результаты внедрения и использования БСМТС в автопарках предприятий Куйбышевской железной дороги – филиала ОАО «РЖД», что способствует снижению рисков возникновения ДТП и повышению безопасности труда при эксплуатации водителями автотранспортных средств.

Ключевые слова: железнодорожная отрасль, производственный травматизм, дорожно-транспортные происшествия, нарушения правил дорожного движения, безопасность труда водителей автомобилей, бортовые системы мониторинга транспортных средств, эмпирическая формула, административный штраф, коэффициент безопасности дорожного движения.

APPLICATION OF AN EMPIRICAL FORMULA IN ASSESSING ROAD SAFETY

© The Author(s) 2024

DEMENTIEVA Yulia Vasilievna, candidate of technical sciences,
associate professor of the Department of Life Safety and Ecology
Samara State Transport University
(443066, Samara, Svoboda st., 2B, yulia_dementyeva@bk.ru)

TATARINTSEV Svyatoslav Dmitrievich, graduate student Department of Life Safety and Ecology
Samara State Transport University
(443066, Samara, Svoboda st., 2B, sv2030@yandex.ru)

Abstract. In this article, the problem of industrial road traffic injuries at enterprises of the railway industry of the Russian Federation is considered. The results of previous scientific research have shown that accidents arising from road accidents occupy a predominant share in the overall dynamics of industrial injuries of JSC Russian Railways. In this regard, there is a need to develop preventive measures aimed at reducing the risks of road accidents (hereinafter referred to as accidents) during the operation of motor vehicles by employees of JSC Russian Railways. In order to reduce the risks of accidents and improve driver safety, on-board vehicle monitoring systems (hereinafter referred to as BSMTS) capable of recognizing and preventing hazards en route were installed on experimental *Ford Transit* buses operated in the structural divisions of the Kuibyshev Railway, a branch of JSC Russian Railways. To quantify road safety (herein-

after – BDD) before and after preventive measures, it was proposed to apply an empirical formula determining the ratio of the number of administrative fines issued by the State Traffic Safety Inspectorate (hereinafter – Traffic Police) for violations of traffic rules (hereinafter – traffic rules) to the total mileage of experimental cars in one year, reduced to 1000 kilometers traveled. The application of the proposed empirical formula made it possible to evaluate the results of the introduction and use of BSMTS in the fleets of enterprises of the Kuibyshev Railway, a branch of JSC Russian Railways, which helps to reduce the risks of accidents and improve the safety of drivers when operating vehicles.

Keywords: railway industry, industrial injuries, traffic accidents, traffic violations, occupational safety of car drivers, on-board vehicle monitoring systems, empirical formula, administrative fine, road safety coefficient.

Для цитирования: Дементьева Ю.В. Применение эмпирической формулы в оценке безопасности дорожного движения / Ю.В. Дементьева, С.Д. Татаринцев // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 1(65). – С. 227-231. – EDN: XIRDUR.

Введение. Приоритетной задачей системы управления охраной труда ОАО «РЖД» является обеспечение для работников безопасных условий труда и предупреждение производственного травматизма [1].

Производственная деятельность предприятий железнодорожного транспорта, в условиях особенностей своего целевого функционирования и специфики труда работников, связана с повышенной опасностью и рисками наступления несчастных случаев [2, 3].

Обеспечение непрерывности технологических процессов предприятий железных дорог обуславливается необходимостью использования в нем автомобильного транспорта, эксплуатация которого сопряжена с риском травмирования железнодорожников в результате ДТП [4].

Результаты стохастического анализа показали, что несчастные случаи, происшедшие при ДТП, занимают преобладающую долю в общей динамике производственного травматизма ОАО «РЖД» [5, 6].

Отметим, что ДТП являются не отраслевыми для ОАО «РЖД» видами происшествий, однако высокие показатели производственного дорожно-транспортного травматизма предприятиях железных дорог указывают на недостаточную эффективность действующей системы управления охраной труда.

В этой связи существует необходимость разработки мер, направленных на снижение рисков ДТП и повышение безопасности труда водителей при эксплуатации автотранспортных средств, а также оценка эффективности проведенных превентивных мероприятий.

Целью настоящего исследования является количественная оценка эффективности результата использования БСМТС, установленных на экспериментальные автомобили, с учетом количества административных штрафов ГИБДД и совокупного пробега автомобилей за один год.

Изначально рассмотрим организацию обеспечения безопасности труда водителей в структурных подразделениях функциональных филиалов ОАО «РЖД», расположенных в границах полигона Куйбышевской железной дороги – филиала ОАО «РЖД». В линейном предприятии назначается ответственный за безопасность дорожного движения, наделен-

ный следующими должностными обязанностями:

- разработка годовых планов по обеспечению безопасности дорожного движения;
- контроль режима труда и отдыха водителей;
- рассмотрение причин ДТП и разработка мероприятий по их профилактике;
- проведение с водителем составом технической учебы и инструктажей по охране труда;
- разработка планов регламентного проведения технического обслуживания и текущего ремонта автомобилей;
- организация контроля технического состояния транспортных средств и прохождения водителем составом предрейсовых медицинских осмотров перед выпуском автомобилей на линию [7].

Наряду с высоким уровнем инновативности процессов управления и эксплуатации инфраструктуры ОАО «РЖД», на предприятиях железных дорог не предусмотрен мировой и отечественный опыт применения интеллектуальных систем распознавания опасности при эксплуатации водителями автотранспортных средств.

Методология. Одним из современных подходов к цифровизации управления охраной труда является применение автоматизированного программного комплекса, способного осуществлять контроль за техническим состоянием автомобиля и состоянием водителя в пути следования, распознавать опасности и предупреждать риски возникновения ДТП [8-10].

Российскими компаниями ООО «КСОР» и YANDEX были представлены устройства, позволяющие анализировать и контролировать физическое состояние водителей посредством биометрической аутентификации и предупреждать инциденты их засыпания [11, 12].

Наряду с этим оборудованием, к использованию возможны интеллектуальные системы распознавания опасности, объединяющие в себе аналитическое программное обеспечение и телематическое оборудование.

Исследования мировых ученых доказывают высокую эффективность внедрения БСМТС в производственный процесс организаций, улучшающий показатели безопасности дорожного движения, а также позволяющий оптимизировать затраты на содержание автомобилей [14-21].

В настоящее время на территории Российской Федерации представлено более 400 моделей, поддерживаемых АО «ГЛОНАСС», имеющих различные протоколы подключения, а также конфигурационные функциональные отличия.

В рамках проводимого научного исследования выбрано устройство БСМТС модели *SMART S-2435 MAX*, которое предназначено для:

- мониторинга состояния транспортного средства (ТС), контроля его местоположения и перемещений, контроля пробега и расхода топлива, подсчета моточасов;
- определения стиля вождения (*EcoDriving*);
- фиксации события ДТП по ГОСТ или индексу тяжести ДТП *ASI*;
- экстренного информирования о несанкционированном проникновении в автомобиль;
- экстренного оповещения о разбойном нападении на водителя или пассажиров и о других нештатных ситуациях;

- работы с *CAN*-шиной автомобиля;
- для обработки и передачи на сервер данных с таких устройств как: тахографы, системы контроля давления в шинах, адаптеры *CAN*-шины, рефрижераторные контроллеры, считыватели *RFID*-меток;
- для контроля температуры с помощью термодатчиков;
- дистанционного управления подключенными устройствами и системами транспортного средства.

В устройстве БСМТС модели *SMART S-2435 MAX* реализованы такие необходимые функции как: *EcoDriving*, фиксация события ДТП по ГОСТ или индексу тяжести ДТП *ASI*, формирование и отправка файла профиля ДТП на сервер, энергосбережение, охранные функции и функцию *Bluetooth*, что открывает возможность для использования беспроводной гарнитуры для двухсторонней связи с водителем [22].

Принципиальная схема работы БСМТС модели *SMART S-2435 MAX* представлена на рисунке 1.

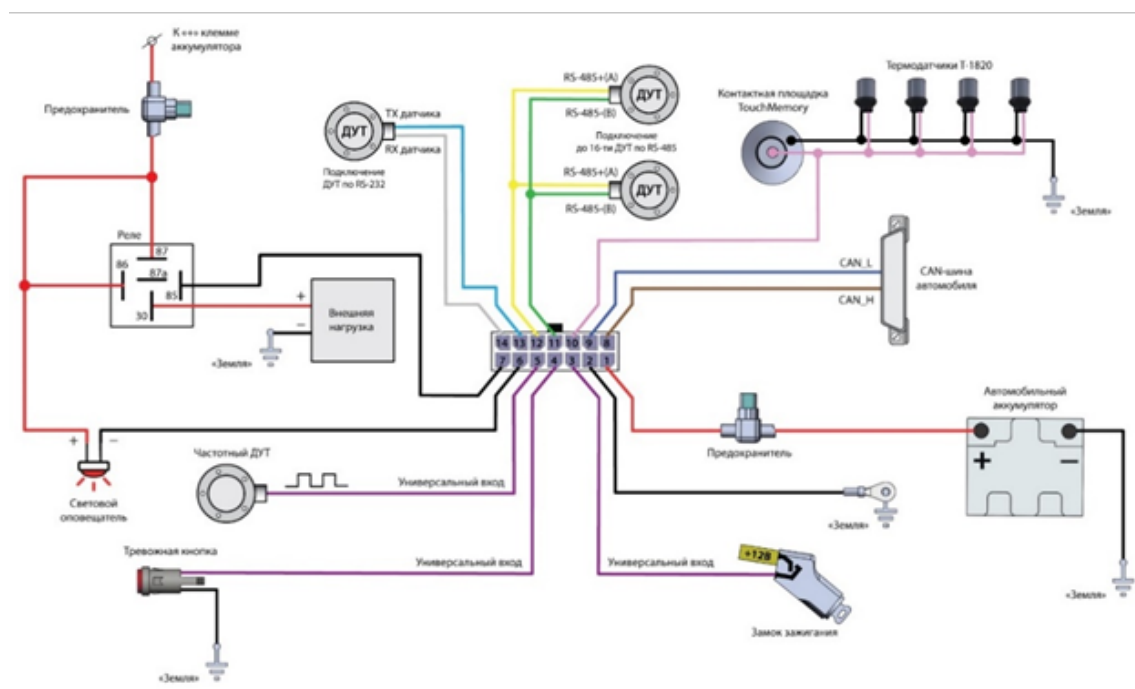


Рисунок 1 – Принципиальная схема работы устройства БСМТС модели *SMART S-2435 MAX*

В целях унификации объектов исследования и исключения получения некорректных данных были выбраны четыре одинаковые экспериментальные автобусы марки *Ford Transit*, находящиеся на балансе Куйбышевской железной дороги – филиала ОАО «РЖД».

Для проведения эксперимента на все четыре автобуса, условно обозначим их *A1*, *A2*, *A3*, *A4*, в августе 2021 года были установлены БСМТС модели *SMART S-2435 MAX*, технические характеристики которых соответствуют необходимым функциональным требованиям [22]. Основным условием БДД является соблюдение ПДД, а их нарушения создают риски ДТП, угрозу жизни и здоровья водителей

автотранспортных средств.

Целью проводимого эксперимента являлась оценка эффективности использования БСМТС в части снижения количества штрафов ГИБДД и рисков ДТП соответственно, как одного из инструментов повышения безопасности труда водителей.

В данном случае адекватной мерой оценки безопасного вождения является количество административных штрафов ГИБДД, полученных водителями за нарушения водителями ПДД, и пробег автотранспортного средства, рассчитанного одометром автомобиля и измеряемого суммой пройденных километров за один год его эксплуатации.

Исходя из данных критериев, получаем эмпи-

рическую формулу расчета коэффициентов безопасности дорожного движения $K_{\text{бод}}$, определяемых соотношением суммы административных штрафов ГИБДД за год $\sum Ш_{\text{год}}$, к сумме совокупного пробега за год $\sum П$, приведенной к 1000 пройденных километров (1).

$$K_{\text{бод}} = \sum Ш_{\text{год}} / \sum П \times 1000 \quad (1)$$

где, $\sum Ш_{\text{год}}$ – количество штрафов ГИБДД за нарушение ПДД за один год;

$\sum П$ – сумма совокупного пробега за год.

Статистические данные нарушений ПДД и совокупного пробега экспериментальных автомобилей за период 2019 по 2023 гг. представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Статистические данные нарушений ПДД и совокупного пробега экспериментальных автомобилей за период 2019 по 2023 гг.

Нарушения ПДД	Автомобиль А					Автомобиль Б				
	2019	2020	2021	2022	2023	2019	2020	2021	2022	2023
Превышение установленной скорости движения ТС	10	9	7	5	3	8	6	4	2	2
Несоблюдение требований дорожных знаков / разметки проезжей части дороги	2	1	1	0	0	0	0	1	0	0
Проезд на запрещающий сигнал светофора, выезд за стоп-линию	1	0	2	0	1	1	2	2	1	0
Нарушение правил расположения ТС на проезжей части, встречного разъезда или обгона	0	2	0	0	0	2	1	0	0	1
Итого штрафов	13	12	10	5	4	11	9	7	4	3
Пробег	43050	42000	43500	43755	42700	43740	42654	42100	42850	43500
Нарушения ПДД	Автомобиль В					Автомобиль Г				
	2019	2020	2021	2022	2023	2019	2020	2021	2022	2023
Превышение установленной скорости движения ТС	12	9	6	6	4	17	15	10	7	2
Несоблюдение требований дорожных знаков / разметки проезжей части дороги	0	1	1	1	1	0	2	0	0	0
Проезд на запрещающий сигнал светофора, выезд за стоп-линию	1	1	2	1	0	1	1	0	0	0
Нарушение правил расположения ТС на проезжей части, встречного разъезда или обгона	2	1	0	0	0	0	0	1	0	0
Итого штрафов	15	12	9	8	5	18	18	11	7	2
Пробег	43200	43156	42674	43650	43800	42946	43800	43798	43000	43650

Результаты. На основании статистических данных рассчитаем $K_{\text{бод}}$ по формуле 1, результаты которых сведем в таблицу 2.

Динамика $K_{\text{бод}}$ в условиях установки и работы устройства БСМТС модели *SMART S-2435 MAX* за

период 2019-2023 гг. представлена в диаграмме на рисунке 2.

Очевидно, что в условиях установки и использования устройства БСМТС на экспериментальных автомобилях $K_{\text{бод}}$ значительно снижается.

Таблица 2 – Эмпирические $K_{\text{бод}}$ за период с 2019 по 2023 гг.

Год	Автомобиль А	Автомобиль Б	Автомобиль В	Автомобиль Г
2019	0,30	0,25	0,35	0,42
2020	0,29	0,21	0,28	0,41
2021	0,11	0,17	0,21	0,25
2022	0,11	0,09	0,18	0,16
2023	0,09	0,07	0,11	0,05

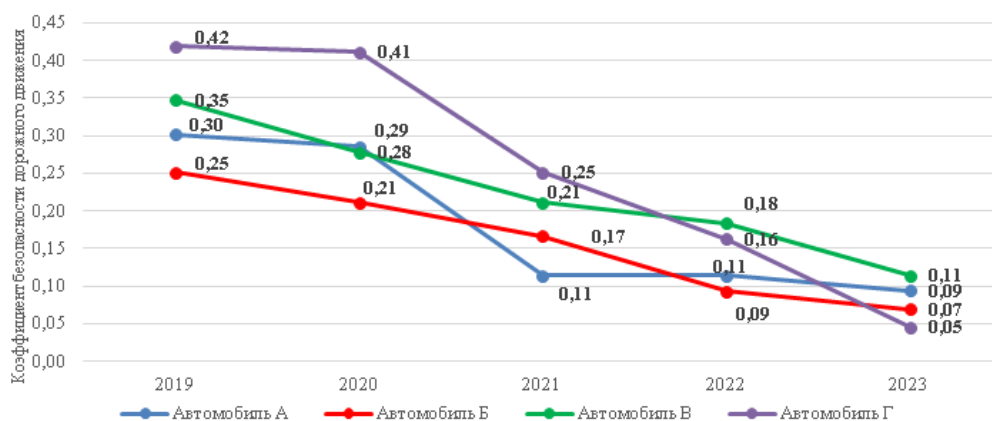


Рисунок 2 – Динамика коэффициентов безопасности дорожного движения $K_{\text{бод}}$ за период 2019-2023 гг.

Обсуждение. Посредством использования эмпирической формулы (1) расчетами установлено, что внедрение в 2021 году БСМТС модели *SMART S-2435 MAX* позволило уменьшить количество административных штрафов ГИБДД, полученных водителями за нарушения ПДД, на 75,43% и снизить $K_{\text{од}}$ на 75,6% соответственно.

В настоящее время существуют различные методы оценки безопасности дорожного движения, которые основаны на результатах выполненных в последние годы научных исследований, учитывающих существенные изменения в составе транспортных потоков, рост интенсивности и скоростей движения. Основные методы, используемые для оценки БДД во всевозможных дорожных условиях, интегрированы в Рекомендации по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах, утвержденных распоряжением Федерального дорожного агентства от 12.01.2011 № 13-р (далее – Рекомендации) [23].

Следует отметить, что в основе методов оценки безопасности дорожного движения, изложенных в Рекомендациях, не учитываются наличие и количество административных штрафов ГИБДД за нарушения водителями ПДД и пробег автотранспортного средства за один год, как факторы, влияющие на БДД.

Выводы. Применение эмпирической формулы расчета коэффициентов безопасности дорожного движения $K_{\text{од}}$ позволяет оценить эффективность проведенных превентивных мероприятий в количественном эквиваленте. Итоги проведенного эксперимента свидетельствуют о том, что внедрение и использование БСМТС *SMART S-2435 MAX*, в автопарках предприятий Куйбышевской железной дороги – филиала ОАО «РЖД» способствует снижению рисков возникновения ДТП и повышению безопасности труда водителей при эксплуатации автотранспортных средств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- СТО РЖД 15.001-2023 «Система управления охраной труда в ОАО «РЖД». Общие положения», утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 09.03.2023 № 515р. – М.: ОАО «РЖД», 2023. – 52 с.
- Аксенов В.А. Аналитический обзор проблемы обеспечения безопасности труда на железнодорожном транспорте В.А. Аксенов, В.С. Чаплыгин // Проблемы безопасности российского общества № 2, 2022; научно-практический журнал-М.: Изд-во РУТ (МИИТ), 2022. – С. 84-88.
- Аксенов В.А. Методический подход к анализу и прогнозированию рисков травмирования на рабочем месте в хозяйстве пути / В.А. Аксенов, А.М. Завьялов, Ю.В. Деметьева // Качество и жизнь. – № 2 (18). – 2018: научно-производственный и культурно-образовательный журнал-М.: Изд-во МОО «АПК», 2018. – С. 93-96.
- Деметьева Ю.В. Анализ дорожно-транспортного травматизма на предприятиях железных дорог [Текст] / Ю.В. Деметьева, С.Д. Татаринцев: сб. материалов II Междунар. школы – конференции «Техносферная безопасность городских агломераций». – Москва: РУТ (МИИТ), 2022. – С. 152-154.
- Деметьева Ю.В. Стохастический факторный анализ производственного травматизма на предприятиях железнодорожного транспорта [Текст] / Ю.В. Деметьева, С.Д. Татаринцев // Безопасность техногенных и природных систем № 4, 2022: международный рецензируемый теоретический и научно-практический журнал-М.: Изд-во ДГТУ, 2022. – С. 6-11.
- Деметьева Ю.В. Исследование причин дорожно-транспортного травматизма на предприятиях железных дорог [Текст] / Ю.В. Деметьева, С.Д. Татаринцев // Наука и техника транспорта № 2, 2023; научно-технический журнал-М.: Изд-во РУТ (МИИТ), 2023. – С. 106-109.
- Распоряжение КБШ Н-317/р от 28.10.2021 «Об утверждении Положения об обеспечении безопасности дорожного движения на автомобильном транспорте в структурных подразделениях, расположенных на полигоне Куйбышевской железной дороге – филиале ОАО «РЖД».
- Аксенов В.А., Формирование системы управления профессиональными рисками на транспорте [Текст] / В.А. Аксенов, П.Н. Потапов., А.М. Завьялов // Наука и техника транспорта № 4, 2013; научно-технический журнал-М.: Изд-во РУТ (МИИТ), 2013. – С. 88-96.
- Аксенов В.А. Совершенствование системы управления рисками для решения задач по обеспечению безопасности производственных процессов [Текст] В.А. Аксенов, Д.Л. Раенок, А.М. Завьялов // Надежность № 3, 2013: научно-технический журнал-М.: Изд-во АО «НИИАС», 2013. – С. 103-120.
- Завьялов А.М., Применение цифровой трансформации в производственных процессах железнодорожного транспорта [Текст] А.М. Завьялов, Т.С. Савельева // Проблемы безопасности российского общества № 2, 2022; научно-практический журнал-М.: Изд-во РУТ (МИИТ), 2022. – С. 89-94.
- Презентация системы мониторинга транспорта и функционального состояния водителя, как мера снижения ДТП в корпоративном автопарке «АНТИСОН». URL <https://xor-group.ru/>.
- Презентация системы мониторинга водителя SignalQ URL <https://signalq.yandex/>.
- Курилова А.С. Современные системы слежения и мониторинга транспорта, используемые на автотранспортных предприятиях // Kant. 2012. – №2 (5).
- Filjar. R. ECall: Automatic notification of a road traffic accident - MIPRO, 2011. – С. 600-605.
- Pešić D., Pešić A.: Monitoring of Road Safety Performance Indicators – Current Situation And Trends In The Republic Of Serbia – Faculty of Transport and Traffic Engineering, 2020. – С. 70-77.
- Pešić, D., Vujančić, M.: Possibility of assessment of road safety level at local community – 8th International Conference Road Safety in Local Community, Valjevo, Serbia, 2013. – С. 1-10.
- M. Vollrath, A.K. Huemer, P. Nowak, O. Pion: Ablenkung durch Informations- und Kommunikationssysteme - Unfallforschung der Versicherer, Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft. V., Berlin, 2014. – С. 1-99.
- Ibtissam El Khalai, Zoubida Chorfi, Abdelaziz Berrado: A Review of Road Safety Monitoring - Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, 2022. – С. 2237-2238.
- Zijun Du, Min Deng Nengchao Lyu, Yugang Wang: A review of road safety evaluation methods based on driving behavior - Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition) Volume 10, Issue 5, 2023. – С. 743-761.
- Performance Assessment of an Onboard Monitoring System for Commercial Motor Vehicle Drivers: A Field Operational Test – U.S. Department of Transportation Federal Motor Safety Administration – 2016.
- Koisaari, T., Utriainen, R., Kari, T., Tervo, T., 2020. The most difficult at-fault fatal crashes to avoid with current active safety technology. Accident Analysis & Prevention 135. – С.1-10.
- Технические характеристики SMART S-2435 MAX <https://navtelecom.ru/ru/oborudovanie/seriya-smart/smart-s-2435>.
- ОДМ 218.4.005-2010 «Рекомендации по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах», утв. распоряжением Федерального дорожного агентства от 12.01.2011 № 13-р. – М.: Минтранс РФ, 2011. – 156 с.

Статья поступила в редакцию 24.12.2023

Статья принята к публикации 15.03.2024

УДК 331.45

EDN: XLKGIJ

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ УСЛОВИЙ ТРУДА НА ПРЕДПРИЯТИЯХ С НАНОДИСПЕРСНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

© Автор(ы)2024

SPIN: 4094-6203

AuthorID: 703800

ORCID: 0000-0003-2477-0058

САМАРИН Евгений Владимирович, кандидат химических наук,
председатель Государственной аттестационной комиссии
кафедры «Технологии переработки полимеров и композиционных материалов»
Казанский национальный исследовательский технологический университет
(420015, Россия, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 72, e-mail: SamarinEV@yandex.ru)

SPIN: 7032-9137

AuthorID: 689966

ORCID: 0000-0002-4214-012X

ХАЙРУЛЛИН Руслан Зуфарович, кандидат биологических наук,
доцент кафедры «Промышленной безопасности»
Казанский национальный исследовательский технологический университет
(420015, Россия, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 68, e-mail: KhayrullinRZ@corp.knrtu.ru)

Аннотация. Рассмотрены основные особенности негативного воздействия нанодисперсных частиц на организм человека, в том числе возможные пути проникновения и распространения, а также факторы, влияющие на их токсичность. Описаны существующие проблемы при проведении специальной оценки условий труда на предприятиях в области нанотехнологий. На основе проведенного анализа имеющихся научно-технических достижений по рассматриваемой тематике и в строгом соответствии с текущими нормативными требованиями разработана методика проведения специальной оценки условий труда на предприятиях с нанодисперсными материалами с учетом их специфических свойств. Предложены принципы и методы реализации каждого из этапов проведения вышеуказанной специальной оценки. Кроме того, проведен обзор применяемых на практике административных и инженерно-технических методов снижения уровня экспозиции нанодисперсных частиц на производственный персонал, а также показаны наиболее применимые виды средств индивидуальной защиты на предприятиях с наноматериалами и приведены методы оценки эффективности их работы. Разработанная методика может быть использована различными коммерческими организациями в области охраны труда для проведения специальной оценки в целях повышения безопасности условий труда на предприятиях наноиндустрии.

Ключевые слова: административные методы, вредные факторы, идентификация опасных материалов, инженерно-технические методы, методика проведения, нанодисперсные материалы, наночастицы, специальная оценка условий труда, средства индивидуальной защиты, счетная концентрация, уровень экспозиции, эффективность фильтрации.

DEVELOPMENT OF LABOR CONDITIONS SPECIAL EVALUATION FOR COMPANIES WITH NANODISPERSED MATERIALS

© The Author(s) 2024

SAMARIN Evgeny Vladimirovich, candidate of chemical sciences, head of Government Certification Commission of the «Technology of Polymers and Composite Materials Processing» department
Kazan National Research Technological University
(420015, Russia, Kazan, Karl Marks str., 72, e-mail: SamarinEV@yandex.ru)

KHAYRULLIN Ruslan Zufarovuch, 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)

Abstract. The main features of nanodispersed particles' negative exposure on human's body, including possible penetration's and diffusion's ways and influencing on their toxicity factors, were considered. Existing problems during execution of labor conditions' special evaluation in companies with nanotechnologies were presented. The execution methodology of labor conditions' special evaluation in companies with nanodispersed materials, based on the performed analysis of present science and technical achievements in view of such substances' specific properties and in strict accordance to current regulatory requirements, was developed. Principles and realization methods of the above labor conditions special evaluation's execution stages were proposed. Moreover, review of existing administrative, engineering and technical reducing methods for nanodispersed particles' exposure levels on production personnel of companies was made. The most usable types of personal protective equipment in companies with nanomaterials and efficiency

evaluation's methods of their work were shown. The developed methodology can be used by different commercial companies, which work in labor protection field, for making of special evaluation with the purpose of labor conditions safety improvement in nanoindustry companies.

Keywords: administrative methods, counting concentration, dangerous materials identification, engineering and technical methods, exposure level, filtration efficiency, harmful factors, labour conditions special evaluation, nanodispersed materials, nanoparticles, personal protective equipment, procedure.

Для цитирования: Самарин Е.В. Разработка методики проведения специальной оценки условий труда на предприятиях с нанодисперсными материалами / Е.В. Самарин, Р.З. Хайруллин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 1(65). – С. 232-241. – EDN: XLKGIIJ.

Введение. В настоящее время благодаря своим уникальным свойствам и высокой экономической эффективности наноматериалы получили широкое распространение и применение в самых различных отраслях: химической и пищевой промышленности, металлургии, энергетике, микроэлектронике, медицине, строительстве, сельском хозяйстве, фармацевтике и многих других.

В мире уже зарегистрировано и промышленно освоено более 1800 наименований наноматериалов [1], а научно-технический прогресс в данной области и, как следствие, появление новых видов соединений, не только не останавливаются, но и продолжают расти опережающими темпами. Так, согласно последним опубликованным данным, в 2022 году мировой рынок наноматериалов оценен в 18,2 миллиардов долларов, а в течение последующих десяти лет ожидается его более чем пятикратный рост – до 93,9 миллиардов долларов [2].

Подобное стремительное развитие стало возможно из-за специфических свойств нанодисперсных частиц – физических, химических, электромагнитных и т.д., которые они проявляют в связи со своими сверхмалыми размерами в диапазоне 1-100 нм. Кроме того, использование наноразмерных частиц в производственных процессах позволяет получать композиционные материалы с необходимыми заданными характеристиками, недостижимыми традиционными методами переработки.

Однако сверхмалые размеры не только влияют на свойства нанодисперсных частиц, но и требуют особого внимания в подходах изучения их воздействия на организм человека, ведь многие стандартные методы оценки безопасности материалов в данном случае не позволяют добиться достоверных результатов.

Проведенные исследования показывают, что токсичность наночастиц напрямую зависит от их характеристик – размеров, формы, химического состава, наличия заряда, структуры поверхности, растворимости и механизмов взаимодействия друг с другом.

При этом основные пути их проникновения в организм человека достаточно разнообразны: ингаляционный при вдыхании, через незащищенные участки кожи и слизистую глаз, пероральный при проглатывании и интраназальный через обонятельный тракт напрямую в центральную нервную

систему [3-7].

Помимо высокой проникающей способности нанодисперсные частицы обладают рядом специфических механизмов негативного воздействия.

Например, они способны интенсивно проникать через клеточные стенки, повреждать мембраны митохондрий, вызывать окислительный стресс и таким образом приводить клетки к гибели [8, 9]. Иммунная система человека не распознает большинство из них, вследствие чего не происходит их биотрансформации и вывода из организма. Поэтому такие частицы могут свободно перемещаться в крови и лимфе человека и проникать в различные ткани и органы, где происходит их накопление в течение длительного времени [10, 11].

Более того, исследования на экспериментальных животных и клеточных системах показывают, что большая площадь поверхности наночастиц вызывает повышенную воспалительную токсичность и онкогенные реакции [12-17].

В то же время до сих пор, несмотря на наличие таких крайне опасных показателей, еще не разработано единого согласованного критерия токсичности нанодисперсных материалов, а данные об оценке их воздействия в производственных условиях часто оказываются противоречивыми [18].

Таким образом, совокупность всех вышеперечисленных особенностей приводит во многих случаях к неверной оценке вредных и потенциально опасных производственных факторов, а это, в свою очередь, влечет за собой применение неэффективных мер безопасности и получение некорректных результатов при проведении специальной оценки условий труда (СОУТ) на предприятиях в области нанотехнологий.

Более того, провести подобные мероприятия согласно требованиям действующей методики [19] довольно проблематично еще и по следующим причинам:

1) в Классификаторе вредных и (или) опасных производственных факторов [19] нет данных о предельно-допустимых концентрациях (ПДК) и классах опасности нанодисперсных материалов, а ведь именно с данными показателями необходимо устанавливать совпадения значений факторов производственной среды, имеющихся на рабочем месте. В настоящий момент подобных сведений нет и в других законодательных документах, т.к. срок

действия единственного утвержденного в Российской Федерации документа с указанием таких данных (ГН 1.2.2633-10 [20]) истек 25 июля 2013 года;

2) определение необходимых нормативных значений показателей безопасности для нанодисперсных материалов является достаточно наукоемким и высокотехнологичным процессом, что также затрудняет его проведение для работников коммерческих организаций широкого профиля, занимающихся проведением СОУТ на предприятиях;

3) сведения о методах оценки физико-химических свойств и токсикологических характеристик наноматериалов часто представлены в научной литературе в виде теоретических концепций, трудно реализуемых в реальных условиях из-за своей требовательности к оборудованию и квалификации персонала, а также высокой стоимости проведения.

Поэтому в целях решения вышеуказанных

проблем, а также подготовки единого механизма проведения в соответствии с требованиями действующего законодательства в области охраны труда [19, 21], была разработана методика проведения СОУТ на предприятиях с нанодисперсными материалами.

Методология. Разработка методики проводилась на основе поиска и анализа различных научных и технических данных о последних мировых достижениях в области организации безопасной работы с нанотехнологиями, а также тщательного исследования текущих нормативных требований, предъявляемых к данному направлению (было отобрано 50 источников из 237 выявленных научных и нормативных работ по рассматриваемой тематике).

Результаты. Схема разработанной методики проведения СОУТ на предприятиях с нанодисперсными материалами представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Схема проведения СОУТ на предприятиях с нанодисперсными материалами

Рассмотрим более подробно принципы и методы реализации каждого из этапов данной методики.

1. Идентификация потенциально вредных и опасных нанодисперсных материалов. 1.1. Идентификация всех имеющихся и образующихся на предприятии нанодисперсных материалов. В связи с высокой потенциальной опасностью в первую очередь необходимо провести идентификацию всех имеющихся на предприятии нанодисперсных материалов вне зависимости от предполагаемой степени их опасности для здоровья работников, которая осуществляется путем осмотра предприятия, изучением технологической схемы производства, а также в результате выполнения анализа всей предоставленной производственной документации.

1.2. Определение физико-химических свойств. Проводится сбор информации о физико-химических характеристиках каждого идентифицированного нанодисперсного материала в целях дальнейшего определения его показателей безопасности.

Для этого в аккредитованных испытательных лабораториях в соответствии с ГОСТ Р 57909-2017 [22] определяются такие свойства, как:

- химический состав (различными методами в зависимости от содержания тех или иных веществ – титриметрией, гравиметрией, жидкостной или газовой хроматографией, спектроскопией инфракрасной или ядерного магнитного резонанса и т.д.);
- удельная площадь поверхности (методом Брунауэра, Эммета и Теллера);
- свойства кристаллической структуры (молярная доля) – в случае растворимых наноматериалов (методами на основе дифракции рентгеновского излучения);
- средний размер и распределение по размерам кристаллических частиц (методами на основе дифракции рентгеновского излучения с использованием формулы Шеррера);
- средний размер, форма и гранулометрический состав первичных частиц (просвечивающей электронной микроскопией);
- растворимость в воде (методами, описанными в ГОСТ 33034-2014 [23]);
- поверхностный заряд частиц (методом электрофоретического рассеяния света).

Полученная информация вместе с пробами наноматериалов передается в аккредитованные медицинские лаборатории для проведения токсикологической, молекулярно-биологической и цитологической оценки в соответствии с методиками, описанными в [24-27].

1.3. Токсикологическая, молекулярно-биологическая и цитологическая оценка. Токсикологическая оценка состоит из определения общетоксического действия на организм животных (измерения переносимых, токсических и летальных доз исследуемого материала), изучения мутагенных свойств и репродуктивной токсичности, а также иммунологических исследований и оценки потенциальной

аллергенности нанодисперсных материалов [24, 25].

Молекулярно-биологическая оценка подразумевает исследования безопасности нанодисперсных материалов следующими методами [26]:

- проводится анализ механизма их воздействия на нормальные и транзиторные компоненты микробиоценоза в условиях естественного перорального пути введения исследуемого вещества в толстую кишку лабораторных животных;
- определяется их способность по индуцированию мутагенеза;
- изучается предрасположенность материалов к провоцированию приобретения генов трансмиссивной антибиотикоустойчивости.

Оценка цитотоксических свойств нанодисперсных материалов проводится методами: с использованием 3-(4,5-диметилтиазол-2-ил)-2,5-дифенилтетразолийбромид; определения активности лактатдегидрогеназы; измерения концентрации аденозинтрифосфата в лейкоцитах [27]; с применением 3-(4,5-диметилтиазол-2-ил)-5-(3-карбоксиметоксифенил)-2-(4-сульфофенил)-2Н-тетразолия [28]; биоломинесценции [29].

В случае наличия на предприятии протоколов аккредитованных лабораторий с результатами ранее проведенных подобных испытаний по тем или иным показателям часть вышеуказанных действий может быть заменена этими данными.

1.4. Определение ПДК материалов в воздухе рабочей зоны. Эксперт выполняет анализ полученных данных согласно требованиям Приложения А ГОСТ 56748.1-2015 [30] и ГН 1.1.701-98 [31], в результате чего определяются значения предельно-допустимых концентраций (ПДК) в воздухе рабочей зоны для всех нанодисперсных материалов, идентифицированных на предприятии.

2. Определение границ проведения СОУТ. 2.1. Определение всех возможных путей перемещения опасных нанодисперсных материалов. На основании результатов осмотра предприятия, изучения технологической схемы производства и предоставленной производственной документации проводится детальный последовательный анализ всего производственного процесса в целях отслеживания и контроля местонахождения частиц на всех этапах работы с нанодисперсными материалами, а также определения всех имеющихся и потенциально возможных путей их перемещения и распространения на предприятии.

2.2. Определение границ рабочих мест персонала для проведения СОУТ. На основании проведенного анализа определяются границы рабочих мест, на которых происходит контакт производственного персонала с опасными нанодисперсными материалами. В рамках данных границ будет проводиться СОУТ.

3. Оценка эффективности мер безопасности на предприятии. Существует несколько направлений методов защиты производственного персонала от

негативного воздействия нанодисперсных частиц:

- административные способы;
- инженерно-технические методы;
- применение средств индивидуальной защиты.

Рассмотрим их более подробно.

3.1. Административные методы. К административным методам относятся:

- разработка инструкций, регламентов и правил по безопасному обращению с нанодисперсными материалами;
- постоянный контроль выполнения вышеуказанных правил и инструкций;
- точное определение в документах предприятия количества работников, которые подвергаются воздействию нанодисперсных частиц, а также введение нормативных ограничений по максимальной продолжительности такой экспозиции;
- организация изолированных границ для участков различных технологических процессов с отсутствием возможности допуска в них посторонних лиц;
- организация медицинского контроля и периодических медицинских обследований состояния здоровья работников с целью определения степени содержания и накопления нанодисперсных частиц в их тканях и жидкостях;
- информирование работников о значениях ПДК и результатах проведения контроля уровня экспозиции нанодисперсных материалов в рабочей зоне, а также о симптомах такого негативного воздействия и порядке действий в случае их появления;
- обучение работников технике безопасности при обращении с нанодисперсными материалами, а также информирование о потенциальных рисках для здоровья при их экспозиции;
- обучение работников методам защиты, правилам проверки работы вентиляции, правилам обращения со средствами индивидуальной защиты и порядку действий в случае возникновения аварий или чрезвычайных ситуаций, а также при ликвидации последствий случайных утечек и аварийных выбросов нанодисперсных материалов;
- осуществление ежедневной уборки рабочего места и производственного оборудования с использованием вакуумных очистителей и герметичных контейнеров для мусора. При этом категорически недопустимо использовать техники уборки, распространяющие нанодисперсные частицы по воздуху – щетки, метлы, сжатый воздух и т.п.;
- организация условий для проведения обязательных гигиенических процедур для работников при смене деятельности (принятие душа после работы, мытье рук перед едой и т.д.);
- организация хранения рабочей и личной одежды работников в отдельных местах;
- разработка в документированных процедурах и контроль выполнения требований по утилизации нанодисперсных материалов и отходов, их содержащих.

3.2. Инженерно-технические методы. Сущест-

вуют следующие инженерно-технические методы:

- полная или частичная изоляция производственных установок, при работе которых происходит выброс нанодисперсных частиц в рабочую зону;
- разделение рабочей зоны предприятия на участки и распределение их по категориям в зависимости от степени экспозиции нанодисперсных частиц на работников. При этом в целях ограничения распространения частиц данные участки изолируются друг от друга;
- проведение на всех вышеуказанных участках контрольных измерений концентраций нанодисперсных частиц, регистрация полученных результатов и проведение их учета по времени;
- использование защитных кабин для персонала или проведение работ в специальных изолированных помещениях;
- использование нанодисперсных материалов только в виде различных эмульсий (полный отказ от их применения в сухом виде);
- установка местных и общих вытяжных вентиляционных систем (вентиляционных камер, вытяжных шкафов, пылеуловителей) со специальными фильтрами из материалов, не пропускающих нанодисперсные частицы (см. ГОСТ Р 70063.1-2022 [32] и ГОСТ Р 70063.2-2022 [33]), организация их регулярного технического обслуживания, а также проверка работоспособности в процессе эксплуатации;
- установка фильтров для отработанного воздуха перед рециркуляцией;
- организация особых условий герметичного хранения и обращения с нанодисперсными материалами на предприятии, а также маркировка емкостей для их хранения и перемещения.

3.3 Средства индивидуальной защиты. Средства индивидуальной защиты вызывают неудобства и накладывают на работников определенные ограничения. Потому по возможности их следует применять только в сочетании с другими мерами безопасности и в тех случаях, когда невозможно добиться требуемого уровня безопасности другими методами.

Наиболее распространенными средствами индивидуальной защиты являются защитная одежда, перчатки, защитные очки, а также различные средства защиты органов дыхания (одноразовые фильтрующие маски, полумаски, респираторы, шлемы и капюшоны с принудительной подачей воздуха).

В документированных процедурах предприятия должны быть установлены все необходимые инструкции и требования по обращению с ними – условия хранения, порядок применения, интервалы замены, предписания по их обработке и утилизации.

В связи с высокой способностью проникновения нанодисперсных частиц через различные материалы к средствам индивидуальной защиты в области наноиндустрии также предъявляются определенные требования.

Так, защитные перчатки рекомендуется выбирать с конструкцией из двух защитных слоев для предотвращения попадания нанодисперсных частиц на кожу работников, а защитные очки должны быть пыленепроницаемыми, плотно прилегать к лицу работника и иметь боковые щитки [34, 35]. При непосредственном контакте с наночастицами рекомендуется использовать латексные или нитриловые перчатки и периодически менять их на новые, а загрязненные лучше складывать в специально предназначенные для этого герметичные контейнеры для последующей утилизации.

В [34] показано, что воздухонепроницаемые ткани на основе нетканых текстильных материалов защищают от нанодисперсных частиц значительно эффективнее, чем хлопчатобумажные ткани, что также необходимо учитывать при выборе материалов для защитной одежды. Защитная одежда должна обеспечивать полную изоляцию кожного покрова работников от внешней среды (иметь длинные рукава и штанины без манжет и карманов, в которых могут скапливаться наночастицы).

В настоящее время наиболее эффективными средствами защиты органов дыхания при работе с нанодисперсными частицами признаны два типа устройств [36]:

- фильтрующие респираторы (с конструкцией из лицевой маски и фильтра). Они делятся в зависимости от их устойчивости к деградации от наночастиц на категории: *N* – для работы без нефтесодержащих частиц; *R* и *P* – для работы в присутствии частиц нефти, а также на классы 95, 99 и 100 в зависимости от минимального уровня их эффективной фильтрации (задерживают 95, 99 и 99,97% наночастиц, соответственно) [37, 38];

- изолирующие респираторы с принудительной подачей воздуха (с конструкцией из лицевой маски

и системы подачи воздуха). Они показывают наилучшие результаты в условиях обедненной кислородом атмосферы, при необходимости их длительного использования, а также при наличии у работников усов или бороды.

При выборе типа респиратора или других средств защиты органов дыхания необходимо учитывать такие параметры, как:

- химические свойства нанодисперсных частиц;
- их токсичность и концентрация;
- уровень физической активности персонала;
- время ношения респиратора.

Однако в настоящий момент возможности по рациональному выбору респираторов и оптимальных фильтров для них сильно ограничены в связи с отсутствием требуемого для этого объема данных о токсичности наноматериалов.

Отчеты ряда исследователей о проверке работы различных типов фильтров показали, что наибольшей эффективностью в случае с наночастицами обладают *HEPA*-фильтры, а также респираторные картриджи и маски, выполненные из волоконистых фильтров [39, 40]. При этом они вариативно справляются с фильтрацией различных типов наноматериалов в зависимости от формы, поверхностного заряда и размера их частиц [40].

Потому перед использованием или во время проведения СОУТ все респираторы и другие средства защиты органов дыхания должны пройти оценку эффективности работы по методикам, описанным в [32] или [33] в зависимости от размеров имеющихся частиц.

Для этого рекомендуется использовать специальные измерительные установки, которые состоят из четырех основных узлов (рис. 2) [41]: системы генерации аэрозоля, испытательной камеры, счетчика частиц и флюометра.

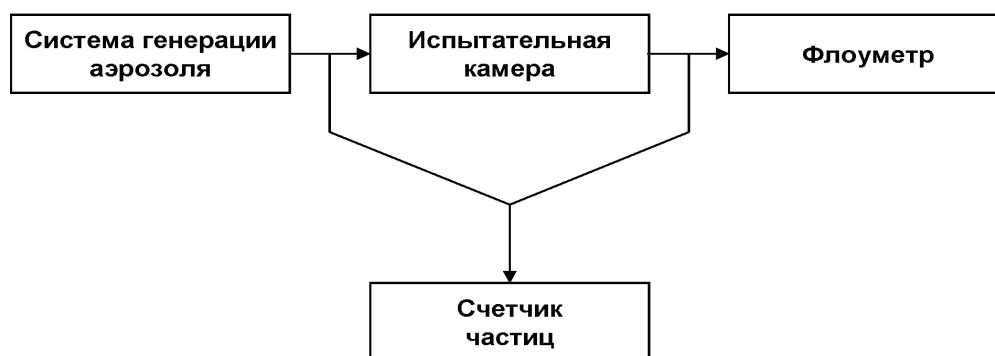


Рисунок 2 – Принципиальная схема установки для определения эффективности фильтрации наночастиц

Система генерации включает в себя камеру для производства нанодисперсных частиц с соответствующим дополнительным оборудованием – диффузионным осушителем и нейтрализатором скорости осаждения [42]. Также для первоначального отбора частиц в зависимости от их размера могут быть добавлены сканирующий мобильный измери-

тель частиц, дифференциальный анализатор подвижности или электростатический сепаратор [43].

Нанодисперсные частицы после генерации поступают в испытательную камеру и проходят через фильтр или испытуемое изделие. Далее счетчик частиц измеряет концентрации частиц до и после фильтра, после чего исходя из соотношения

полученных значений определяется значение эффективности производимой фильтрации. Также параллельно для каждого соответствующего значения фильтрации регистрируется и записывается скорость потока воздуха.

Рекомендуется проводить испытания не только фильтрующего элемента, но и всего защитного изделия в целом так, как это было показано в работах с помещением респиратора в коробку из плексигласа и его запечатыванием расплавленным воском [41] или закреплением на лице манекена с помощью силиконового герметика [44, 45].

Подобные измерительные установки могут также использоваться и для испытаний различных видов защитной одежды в случае отсутствия заключения об эффективности их защиты от проникновения нанодисперсных частиц.

4. Определение уровней экспозиции на рабочих местах. Определение показателей безопасности условий труда на предприятии проводится на основе данных измерения уровней экспозиции опасных нанодисперсных материалов в ранее выявленных границах рабочих мест, проведения медицинского обследования рабочего персонала и оценки эффективности применяемых мер безопасности.

Оценка эффективности вышеуказанных мер на предприятии проводится на основе заключений медицинского обследования состояния здоровья работников, а также сравнения результатов измерения уровней экспозиции опасных наноматериалов на рабочих участках с установленными значениями их ПДК.

4.1. Медицинское обследование работников. Необходимо провести проверку наличия и выполнения на предприятии документированных процедур контроля состояния здоровья работников (медицинских обследований). В них должна быть отображена периодичность проведения наблюдений и прописаны механизмы по выявлению вероятности возникновения заболеваний, а также ухудшения состояния здоровья при работе с определенными нанодисперсными материалами.

В случае отсутствия или невыполнения данных процедур требуется провести в медицинских учреждениях полное медицинское обследование работников предприятия с целью определения текущего состояния их здоровья, а также получения клинической картины потенциального негативного влияния нанодисперсных частиц с последующим систематизацией и анализом ранее полученных результатов.

В рамках вышеуказанного обследования проводятся анализ содержания наночастиц в крови и моче работников, а также проверка состояния их легких. В случае наличия показаний рекомендуется также провести исследование тканей и органов, на работу которых поступили жалобы.

4.2. Измерение текущих значений концентраций нанодисперсных частиц. В связи со специфическими

свойствами нанодисперсных нерастворимых частиц (малой массой, значительной площадью поверхности, быстрым рассеиванием в воздухе и склонностью к образованию агломератов) традиционный гравиметрический метод контроля пыли не применим в данном случае.

В исследовании [38] показано, что наиболее значимую корреляцию с показателями токсичности у наночастиц имеют не значения массы, а счетная концентрация, распределения по размерам, тип поверхности частиц и ее активность. Поэтому помимо значений массы следует определять и эти характеристики.

Измерение уровней экспозиции опасных нанодисперсных материалов на рабочих местах осуществляется поэтапно комплексным подходом, то есть одновременно используется несколько методов в соответствии с [30].

Первый этап заключается в измерении счетной концентрации наночастиц с помощью счетчика конденсированных частиц (СКЧ). Принцип работы СКЧ заключается в конденсации пара на наночастицах с образованием капель, которые и подсчитываются (для измерения частиц диаметром $10 \div 1000$ нм). В случае обнаружения агломерированных наночастиц также добавляется оптический счетчик частиц.

На втором этапе определяют распределение наночастиц по размерам и их химический состав путем отбора на фильтры и выполнения анализ проб методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) в сочетании с энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией (ЭДРС) [46]. Для этих целей также допустимо использование растровой электронной микроскопии в сочетании с ЭДРС, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и других методов химического анализа [47–49] с чувствительностью, обеспечивающей получение достоверных результатов измерений.

При отсутствии возможности использования ПЭМ допустимо в зависимости от размеров и физико-химических характеристик частиц также использовать следующие методы для измерения:

- счетную концентрацию отобранных по заданному размеру (диаметру подвижности) частиц дифференциальным измерителем размеров частиц в режиме реального времени, тем самым получая значения распределения частиц по размерам на основе анализа их подвижности. При известных значениях заряда и плотности наночастиц с помощью значений их счетной концентрации возможно вычислить значения массовой концентрации и площади поверхности [30, 50];

- массовую концентрацию наночастиц (диаметром менее 100 нм) гравиметрическими или химическими методами, предварительно выполнив отбор наночастиц заданных размеров с помощью пробоотборника (например, для частиц диаметром менее 100 нм можно использовать каскадный

импактор низкого давления) [30];

- массовую концентрацию наночастиц с помощью вибрационных микровесов со специальной конической насадкой для отбора наночастиц заданных размеров [30];

- измерение активной площади поверхности наночастиц с помощью диффузионного нагнетателя (для частиц с диаметром более 100 нм площадь их активной поверхности нельзя напрямую соотносить с геометрической площадью поверхности). Перед измерением наночастицы заданных размеров предварительно отбирают с помощью соответствующих приборов [30];

- измерение активной площади поверхности отобранных по заданным размерам (аэродинамическому диаметру) наночастиц электрическим импактором низкого давления, из полученных значений которой вычисляются значения счетной концентрации наночастиц. Также, используя значения заряда и плотности наночастиц, по значениям счетной концентрации наночастиц определяется их массовая концентрация [30].

5. Оформление результатов СОУТ. По результатам проведенных исследований и измерений вредных и (или) опасных факторов эксперт выполняет отнесение условий труда на рабочем месте по степени вредности и (или) опасности к классу (подклассу) условий труда. При этом учитывается степень отклонения фактических значений вредных и (или) опасных факторов от нормативов условий труда и продолжительности их воздействия на работника в течение рабочего дня (смены), а также эффективность применяемых мер безопасности на предприятии.

Отнесение условий труда на рабочем месте по степени вредности и (или) опасности к классу (подклассу) условий труда по другим вредным и (или) опасным факторам проводится по стандартной методике, описанной в [19, 21].

После определения классов (подклассов) условий труда эксперт заполняет форму отчета о проведении специальной оценки условий труда в соответствии с требованиями [19].

Обсуждение. Разработанная методика полностью соответствует уже существующим и регламентированным в [19] универсальным процедурам проведения СОУТ, но при этом дополняет их и инструктирует экспертов в области охраны труда о необходимых действиях при работе с нанодисперсными материалами в случае недостатка или отсутствия научно-технической информации, требуемой в связи с наличием у них ряда специфических особенностей.

Выводы. В результате проведения поиска и анализа различных научно-технических и нормативных источников в области организации безопасной работы была разработана методика проведения СОУТ на предприятиях с нанодисперсными материалами.

Применение данной методики позволит зна-

чительно повысить уровень безопасности производственного персонала в отрасли наноиндустрии, а также сократить временные и трудовые затраты коммерческих организаций в области охраны труда, связанные с высокой наукоемкостью и специфичностью области нанотехнологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 31.10.2007 № 79 «Об утверждении Концепции токсикологических исследований, методологии оценки риска, методов идентификации и количественного определения наноматериалов» (зарегистрировано в Минюсте РФ 07.07.2010 № 17743). – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_102463 (дата обращения 11.01.2024).
2. Nanomaterials Market Research Report Information By Material type (Metal and Non-Metal Oxides, Carbon-based, Chemicals & Polymers), By Application (Transportation, Construction, Packaging, Consumer Goods, Electrical & Electronics) And By Region (North America, Europe, Asia-Pacific, And Rest Of The World) – Market Forecast Till 2032. URL: <https://www.marketresearchfuture.com/reports/nanomaterials-market-7814> (дата обращения 12.01.2024).
3. Wohlfart, S. Transport of drugs across the blood-brain barrier by nanoparticles / S. Wohlfart, S. Gelperina, J. Kreuter // J Control Release. – 2012. – № 2 (161). – P. 264-273. – DOI: 10.1016/j.jconrel.2011.08.017.
4. Buzea, C. Nanomaterials and nanoparticles: sources and toxicity / C. Buzea, I.I. Pacheco, K. Robbie // Biointerphases. – 2007. – № 4 (2). – P. 17-71. – DOI: 10.1116/1.2815690.
5. Oberdörster, G. Toxicology of nanoparticles: A historical perspective / G. Oberdörster, V. Stone, K. Donaldson // Nanotoxicology. – 2007. – № 1 (1). – P. 2-25. – DOI: 10.1080/17435390701314761.
6. Elder, A. Translocation of inhaled ultrafine manganese oxide particles to the central nervous system / A. Elder, R. Gelein, V. Silva Vanessa, et al. // Environ. Health Perspect. – 2006. – № 8 (114). – P. 1172-1178. – DOI: 10.1289/ehp.9030.
7. Wang, J. Potential neurological lesion after nasal instillation of TiO₂ nanoparticles in the anatase and rutile crystal phases / J. Wang, C. Chen, Y. Liu, et al. // Toxicol. Lett. – 2008. – № 1-3 (183). – P. 72-80. – DOI: 10.1016/j.toxlet.2008.10.001.
8. Geiser, M. Ultrafine particles cross cellular membranes by nonphagocytic mechanisms in lungs and in cultured cells / M. Geiser, B. Rothen-Rutishauser, N. Kapp, et al. // Environ. Health Perspect. – 2005. – № 11 (113). – P. 1555-1560. – DOI: 10.1289/ehp.8006.
9. Li, N. Ultrafine particulate pollutants induce oxidative stress and mitochondrial damage / N. Li, C. Sioutas, A. Cho, et al. // Environ. Health Perspect. – 2003. – № 4 (111). – P. 455-460. – DOI: 10.1289/ehp.6000.
10. Renwick, L.C. Increased inflammation and altered macrophage chemotactic responses caused by two ultrafine particles / L.C. Renwick, D. Brown, A. Clouter, K. Donaldson // Occup. Environ. Med. – 2004. – № 5 (61). – P. 442-447. – DOI: 10.1136/oem.2003.008227.
11. Nolte, M.T. Nanoparticles in bodily tissues: predicting their equilibrium distributions / M.T. Nolte, B. Lu, A.J. Hendriks // Environ. Sci.: Nano. – 2023. – № 10. – P. 424-439. – DOI: 10.1039/D2EN00469K.
12. Oberdörster, G. Increased pulmonary toxicity of inhaled ultrafine particles: Due to lung overload alone? / G. Oberdörster, J. Ferin, S. Soderholm, et al. // Ann. Occup. Hyg. – 1994. – № 1 (38). – P. 295-302.
13. Oberdörster, G. Translocation of inhaled ultrafine particles to the brain / G. Oberdörster, Z. Sharp, V. Atudorei, et al. // Inhal. Toxicol. – 2004. – № 6-7 (16). – P. 437-445. – DOI: 10.1080/08958370490439597.
14. Brown, D.M. Size-dependent proinflammatory effects of ultrafine polystyrene particles: A role for surface area and oxidative stress in the enhanced activity of ultrafines / D.M. Brown, M.R. Wilson, W. MacNee, V. Stone, K. Donaldson // Toxicol. Appl. Pharmacol. – 2001. – № 3 (175). – P. 191-199. – DOI: 10.1006/taap.2001.9240.
15. Driscoll, K.E. Role of inflammation in the development of rat lung tumors in response to chronic particle exposure / K.E.

- Driscoll // Particle Overload in the Rat Lung and Lung Cancer: Implications for Human Risk Assessment. Proceedings of a symposium held at the Massachusetts Institute of Technology (March 29-30, 1995). – Washington D.C.: Taylor & Francis, 1996. – P. 139-153.
16. Tran, CL. Development of a Biomathematical Lung Model to Describe the Exposure-Dose Relationship for Inhaled Dust Among U.K. Coal Miners / C.L. Tran, D. Buchanan // Institute of Occupational Medicine Research Report TM/00/02. – Edinburgh: IOM, 2000. – P. 373-415.
17. Белицкий, Г.А. Механизмы канцерогенного действия наноматериалов / Г.А. Белицкий, К.И. Кирсанов, Е.А. Лесовая, М.Г. Якубовская // Успехи молекулярной онкологии. – 2022. – Т. 9. – № 4. – С. 8-23. – DOI: 10.17650/2313-805X-2022-9-4-23.
18. Mihalache, R.. Occupational exposure limits for manufactured nanomaterials, a systematic review / R. Mihalache, J. Verbeek, H. Graczyk, V. Murashov, P. van Broekhuizen // Nanotoxicology. – 2017. – № 1 (11). – P. 7-19. – DOI: 10.1080/17435390.2016.1262920.
19. Приказ Минтруда России от 24.01.2014 № 33н (ред. от 27.04.2020) «Об утверждении Методики проведения специальной оценки условий труда, Классификатора вредных и (или) опасных производственных факторов, формы отчета о проведении специальной оценки условий труда и инструкции по ее заполнению» (Зарегистрировано в Минюсте России 21.03.2014 № 31689). – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_158398/?ysclid=lslhewed5e54956788 (дата обращения 20.01.2024).
20. ГН 1.2.2633-10. Гигиенические нормативы содержания приоритетных наноматериалов в объектах окружающей среды (утв. Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 25.05.2010 № 60). – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_102463/62cfff7b641422a9dc8d1f017fc3267f0de7d5b/?ysclid=lslhxx2lth64058488 (дата обращения 22.01.2024).
21. Федеральный закон РФ № 426-ФЗ от 28.12.2013 «О специальной оценке условий труда». – URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/38048> (дата обращения 23.01.2024).
22. ГОСТ Р 57909-2017. Нанотехнологии. Порошки из наночастиц. Основные характеристики и методы их определения. – Введ. 2018-09-01. – М.: Стандартинформ, 2017. – 12 с.
23. ГОСТ 33034-2014. Методы испытаний химической продукции, представляющей опасность для окружающей среды. Растворимость в воде. – Введ. 2015-08-01. – М.: Стандартинформ, 2019. – 15 с.
24. Методические указания МУ 1.2.2520-09. Токсиколого-гигиеническая оценка безопасности наноматериалов // Бюллетень нормативных и методических документов. – 2009. – № 4 (38). – 31 с.
25. ГОСТ Р 57933-2017. Нанотехнологии. Наноматериалы. Токсиколого-гигиеническая оценка безопасности. Общие требования к проведению испытаний на лабораторных животных. – Введ. 2018-09-01. – М.: Стандартинформ, 2017. – 16 с.
26. Методические указания МУ 1.2.2634-10. Микробиологическая и молекулярно-генетическая оценка воздействия наноматериалов на представителей микробиоценоза. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. – 59 с.
27. Методические указания МУ 1.2.2635-10. Медико-биологическая оценка безопасности наноматериалов. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. – 122 с.
28. Malich, G. The sensitivity and specificity of the mts tetrazolium assay for detecting the in vitro cytotoxicity of 20 chemicals using human cell lines / G. Malich, B. Markovic, C. Winder // Toxicology. – 1997. – № 3 (124). – P. 179-192. – DOI: 10.1016/S0300-483X(97)00151-0.
29. Crouch, S.P.M. The use of ATP bioluminescence as a measure of cell proliferation and cytotoxicity / S.P.M. Crouch, R. Kozlowski, K.J. Slater, J. Fletcher // J. Immunol. Methods. – 1993. – № 1 (160). – P. 81-88. – DOI: 10.1016/0022-1759(93)90011-u.
30. ГОСТ Р 56748.1-2015. Нанотехнологии. Наноматериалы. Менеджмент риска. Часть 1. Общие положения. – Введ. 2016-07-01. – М.: Стандартинформ, 2016. – 40 с.
31. ГН 1.1.701-98. Гигиенические критерии для обоснования необходимости разработки ПДК и ОБУВ (ОДУ) вредных веществ в воздухе рабочей зоны, атмосферном воздухе населенных мест, воде водных объектов (Утверждены Постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 30 апреля 1998 г. № 15). – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_101784/?ysclid=lslidez1no329434620 (дата обращения: 25.01.2024).
32. ГОСТ Р 70063.1-2022. Материалы фильтрующие для улавливания наночастиц. Методика испытаний для определения эффективности улавливания сферических наночастиц. Часть 1. Наночастицы размером в диапазоне от 20 до 500 нм. – Введ. 2023-01-01. – М.: Российский институт стандартизации, 2022. – 52 с.
33. ГОСТ Р 70063.2-2022. Материалы фильтрующие для улавливания наночастиц. Методика испытаний для определения эффективности улавливания сферических наночастиц. Часть 2. Наночастицы размером в диапазоне от 3 до 30 нм. – Введ. 2023-01-01. – М.: Российский институт стандартизации, 2022. – 52 с.
34. Golanski, L. Experimental evaluation of personal protection devices against graphite nanoaerosols: Fibrous filter media, masks, protective clothing, and gloves / L. Golanski, A. Guiot, F. Rouillon, J. Pocachard, F. Tardif // Hum. Exp. Toxicol. – 2009. – № 6-7 (28). – P. 353-359. – DOI: 10.1177/0960327109105157.
35. NANOSAFE dissemination report. Are conventional protective devices such as fibrous filter media, respirator cartridges, protective clothing and gloves also efficient for nanoaerosols? – URL: www.nanosafe.org/scripts/home/public/content/templates/show.asp?P=63&L=EN&ITEMID=13 (дата обращения 25.01.2024).
36. Rengasamy, S. Nanoparticle penetration through filter media and leakage through face seal interface of N95 filtering facepiece respirators / S. Rengasamy, B.C. Eimer // Ann. Occup. Hyg. – 2012. – № 5 (56). – P. 568-580. – DOI: 10.1093/annhyg/mer122.
37. Rengasamy, S. Filtration performance of NIOSH-approved N95 and P100 filtering facepiece respirators against 4 to 30 nanometer-size nanoparticles / S. Rengasamy, W.P. King, B.C. Eimer, R.E. Shaffer // J. Occup. Environ. Hyg. – 2008. – № 9 (5). – P. 556-564. – DOI: 10.1080/15459620802275387.
38. Approaches to Safe Nanotechnology: Managing the Health and Safety Concerns Associated with Engineered Nanomaterials // Department of health and Human services. Centers for Disease Control and Prevention National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). Cincinnati: 2009. – 104 p. URL: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2009-125/pdfs/2009-125.pdf> (дата обращения 10.02.2024).
39. Bollinger N. NIOSH Respirator Selection Logic. DHHS (NIOSH) Publication No. 2005-100. Cincinnati, OH. – 2004. – URL: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2005-100/pdfs/2005-100.pdf?id=10.26616/NIOSH-PUB2005100> (дата обращения 11.02.2024).
40. Podgórski, A. Modelling the deposition of fractal-like aggregates / A. Podgórski, A. Bałazy, T.M. Trzeciak // J. Aerosol. Sci. – 2004. – № 1 (35). – P. 203-250. – DOI:10.1016/J.JAE-ROSCI.2004.06.065.
41. Dolez, P.I. Personal protective equipment against nanoparticles / P.I. Dolez, N. Bodila, J. Lara, G. Truchon // Int. J. Nanotechnol. – 2010. – № 1 (7). – P. 99-117. – DOI:10.1504/IJNT.2010.029550.
42. Yun, K.M. Nanoparticle filtration by electrospun polymer fibers / K.M. Yun, C.J. Jr. Hogan, Y. Matsubayashi, M. Kawabe, F. Iskandar, K. Okuyama // Chem. Eng. Sci. – 2007. – № 17 (62). – P. 4751-4759. – DOI:10.1016/J.CES.2007.06.007.
43. Jung, S.J. Effects of environment pollution on the ocular surface / S.J. Jung, J.S. Mehta, L. Tong // Ocul. Surf. – 2018. – № 2 (16). – P. 198-205. – DOI: 10.1016/j.jtos.2018.03.001.
44. NIOSH. Workplace Design Solutions: Protecting Workers during the Handling of Nanomaterials. Cincinnati, OH: U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH) Publication No. 2018-121. – URL: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2018-121/default.html> (дата обращения 11.02.2024).
45. American Conference of Governmental Industrial Hygienists. 2016 TLVs and BEIs: Based on the Documentation of the Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents & Biological Exposure Indices. Cincinnati, OH: ACGIH; 2016. – URL: <https://www.acgih.org/forms/ProductFormPu>

blic/2016-tlvs-and-beis (дата обращения 11.02.2024).

46. Methner, M. Nanoparticle emission assessment technique (NEAT) for the identification and measurement of potential inhalation exposure to engineered nanomaterials – Part A / M. Methner, L. Hodson, C. Geraci // J. Occup. Environ. Hyg. – 2010. № 3 (7). – P. 127-132. – DOI: 10.1080/15459620903476355.

47. Brouwer, D.H. Personal Exposure to Ultrafine Particles in the Workplace: Exploring Sampling Techniques and Strategies / D.H. Brouwer, J.H. Gijsbers, M.W. Lurvink // Ann. Occup. Hyg. – 2004. – № 5 (48). – P. 439-453. – DOI: 10.1093/annhyg/meh040.

48. OECD. 2009. No 11: Emission Assessment for Identification of Sources and Release of Airborne Manufactured Nanomaterials in the Workplace: Compilation of Existing Guidance, ENV/JM/MONO, 2009. – № 16. – 17 p. – URL: [https://one.oecd.org/document/ENV/CHEM/NANO\(2009\)11/ADD2/en/pdf](https://one.oecd.org/document/ENV/CHEM/NANO(2009)11/ADD2/en/pdf) (дата обращения 12.02.2024).

49. Brouwer, D. From workplace air measurement results toward estimates of exposure? Development of a strategy to assess exposure to manufactured nano-objects / D. Brouwer, B. van Duuren-Stuurman, M. Berges, E. Jankowska, D. Bard, D. Mark // J. Nanopart. Res. – 2009. – № 8 (11). – P. 1867-1881. – DOI: 10.1007/s11051-009-9772-1.

50. ГОСТ Р ИСО 28439-2015. Воздух рабочей зоны. Характеристика ультрадисперсных аэрозолей и наноаэрозолей. Определение распределения частиц по размерам и счетной концентрации частиц с применением систем анализа дифференциальной электрической подвижности. – Введ. 2016-12-01. – М.: Стандартинформ, 2019. – 20 с.

Статья поступила в редакцию 14.02.2024

Статья принята к публикации 15.03.2024

УДК 614.87, 614.8.084, 331.467, 62-78

EDN: XSEFTI

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА УРОВЕНЬ ЗРЕЛОСТИ ПРОЦЕССА ВНУТРЕННЕГО РАССЛЕДОВАНИЯ ПРОИСШЕСТВИЙ

© Авторы 2024

ORCID: 0009-0000-2323-3657

НИКИТИНА Дарья Александровна, аспирант университета

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина

(119991, Россия, Москва, проспект Ленинский, 65 к.1, e-mail: daria.nikitina@bp.com)

ORCID: 0000-0001-9769-5977

ФОМИНА Екатерина Евгеньевна, доктор технических наук, доцент,

заместитель заведующего кафедрой по учебной работе,

кафедра «Промышленная безопасность и охрана окружающей среды»

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина

(119991, Россия, Москва, проспект Ленинский, 65 к.1, e-mail: ka72@bk.ru)

Аннотация. Основная идея проведенного анализа заключается в том, что для того, чтобы качественно проводить расследование происшествий, необходимо периодически оценивать уровень зрелости данного процесса. Процесс расследования происшествий, который необходимо выполнять согласно законодательным требованиям, имеет четкую последовательность и большое количество документов, регламентов и рекомендаций, позволяющих качественно выполнять данный процесс. Однако, что касается процесса внутреннего расследования происшествий, то на данный момент не существует методики для оценки зрелости, что не позволяет своевременно определять эффективность процесса и выполнять постоянное улучшение. Для того, чтобы провести оценку зрелости процесса внутреннего расследования происшествий изначально необходимо понять по каким критериям необходимо проводить данную оценку. В данной статье описывается процесс определения факторов, влияющих на уровень зрелости процесса внутреннего расследования происшествий. Были изучены труды и существующие материалы по проведению эффективного расследования происшествий. В результате чего были определены 20 факторов, влияющих на уровень зрелости процесса внутреннего расследования происшествий. Затем было проведено анкетирование специалистов в области промышленной безопасности, охраны труда и окружающей среды с целью получения обратной связи касательно значимости предложенных факторов. Затем была проведена математическая оценка результатов анкетирования, в рамках которой были рассчитаны показатели согласованности, весовые коэффициенты и коэффициент конкордации Кендалла. Таким образом, по результатам анкетирования были определены 16 факторов, которые подлежат учету при оценке зрелости процесса внутреннего расследования происшествий.

Ключевые слова: расследование, происшествие, фактор, эффективность, зрелость, внутреннее расследование, безопасность, процесс, анкетирование, коренные причины.

IDENTIFICATION OF FACTORS WHICH IMPACT INTERNAL INCIDENT INVESTIGATION EFFICIENCY

© Authors 2024

NIKITINA Daria Alexandrovna, post-graduate student

National University of Oil and Gas "Gubkin University"

(119991, Russia, Moscow, Leninsky prospect, 65 b.1, e-mail: daria.nikitina@bp.com)

FOMINA Ekaterina Evgenyevna, doctor of technical sciences, associate professor,

deputy head of department of Industrial Safety and Environment Protection

National University of Oil and Gas "Gubkin University"

(119991, Russia, Moscow, Leninsky prospect, 65 b.1, e-mail: ka72@bk.ru)

Abstract. The main idea of the analysis is that in order to conduct high-quality incident investigations, it is necessary to periodically assess the level of efficiency of this process. The incident investigation process, which must be carried out in accordance with legal requirements, has a clear sequence and many documents, regulations and recommendations that allow this process to be carried out efficiently. However, with regard to the internal incident investigation process, there is currently no methodology for assessing efficiency, which does not allow timely determination of the effectiveness of the process and continuous improvement. In order to assess the efficiency of the internal incident investigation process, it is initially necessary to understand by what criteria this assessment must be carried out. This article describes the process of identifying components that influence the level of efficiency of the internal incident investigation process. To begin with, works and existing materials on conducting effective incident investigations were studied. As a result, 20 factors were identified that influence the level of efficiency of the internal incident investigation process. Then, a survey was conducted among specialists in the field of industrial safety, labor protection and the environment in order to obtain feedback regarding the significance of the proposed factors. Then a mathematical assessment of the survey results was carried out, within which consistency indicators, weighting coefficients and the Kendell concordance coefficient were

calculated. Thus, based on the results of the survey, 16 components were identified that must be taken into account when assessing the efficiency of the internal incident investigation process.

Key words: investigation, incident, component, effectiveness, efficiency, internal investigation, safety, process, survey, root causes.

Для цитирования: Никитина Д.А. Определение факторов, влияющих на уровень зрелости процесса внутреннего расследования происшествий / Д.А. Никитина, Е.Е. Фомина // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 1(65). – С. 242-247. – EDN: XSEFTI.

Введение. На сегодняшний день крупные энергетические компании, работающие с опасными производственными объектами, проводят внутренние расследование происшествий параллельно с обязательными законодательными расследованиями [1-5]. Результаты внутренних аудитов свидетельствуют о наличии отклонений от процедуры внутреннего расследования происшествий [6]. Как отмечается многими исследователями (А.Н. Герасимов [7], А.В. Щипанов [8] и др. [9,10]) для проведения качественного внутреннего расследования происшествий необходимо своевременно оценивать эффективность процесса. В настоящее время проблеме совершенствования процесса расследования происшествий посвящены многочисленные научные исследования, в том числе Е.А. Кузнецовой [11], Д.Х. Муртузовой [12], А.Н. Смагиной [13], М.Е. Тхорь [14], А.М. Adelstein [15], J.R. Anderson [16]. Однако существующие исследования направлены на изучение отдельных элементов обязательного расследования, таких как сроки расследования, компетентность членов комиссии, оценка степени вины пострадавшего и др. Это свидетельствует о том, что проблема оценки эффективности проведения внутреннего расследования происшествий остаётся малоизученной. Однако для того, чтобы оценить качество и зрелость процесса внутреннего расследования происшествий, необходимо определить факторы, подлежащие оценке.

Методология. Конечной целью исследования является определение факторов, влияющих на уровень зрелости процесса внутреннего расследования происшествий. При определении факторов, влияющих на эффективность процесса проведения внутреннего расследования происшествий, был использован системный подход и диалектический

метод исследования. Также были использованы метод экспертных оценок, метод анкетирования, метод анализа, метод исследования причинно-следственных связей. Анкетирование проводилось с использованием *Microsoft Forms*. При количественной обработке результатов анкетирования был использован метод ранжирования. Количественная обработка проводилась с использованием *Excel*.

Результаты. На первом этапе на основе анализа причин возникновения происшествий [17-20], были отобраны 20 факторов, влияющих на уровень зрелости процесса внутреннего расследования происшествий. По данным факторам разработана анкета для экспертной оценки. Критериями отбора экспертов являлись: компетентность в вопросах охраны труда, промышленной и экологической безопасности, наличие теоретических и практических знаний в области проведения расследований происшествий, стаж работы в энергетической отрасли не менее 2 лет и опыт в расследовании происшествий и/или разработке локальных нормативных документов (ЛНД) по расследованию происшествий.

Целевая аудитория экспертов представлена в таблице 1. Ключевым условием проведения экспертного опроса являлась полная анонимность. В анкетировании приняли участие представители 17 организаций (ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород», «Фр», ООО «НИИ Транснефть», ПАО «НК «Роснефть», АО «НТЦ «Промышленная безопасность», ООО «РН-Уватнефтегаз», ООО «ОПТИМУМ», ПАО «Транснефть», Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору Западно-Уральское управление Ростехнадзора, ПАО «Газпром нефть», ФГАУ ОБОРОНЛЕС МИНОБОРОНЫ РОССИИ, ООО «Промтехзащита», АО «Вимм Билль Данн», «Lactalis»).

Таблица 1 – Целевая аудитория экспертов

Категория	Количество экспертов
Специалист производственных подразделений (инженер, ведущий инженер, главный инженер/специалист) линейный	10
Специалист (администрация)	63
Руководитель линейный (бригадир, начальник установки и др.)	2
Руководитель (администрация) (начальник отдела, зам. начальника отдела)	24
Менеджер проекта (супервайзер)	4
Руководитель высшего звена (начальник департамента, заместитель генерального директора, генеральный директор)	4
Специалист Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору	4
Всего:	111

Для обработки полученных данных анкетирования был использован программный продукт *Microsoft Excel*. После анкетирования была проведена количественная оценка компетентности ответов экспертов и определение их согласованности, с помощью определения коэффициента конкордации Кенделла и подхода, основанного на оценке близости мнения эксперта к среднему мнению всех участников опроса. Так ответ “не согласен” переводился в балл -1, “сомневаюсь” 0, “согласен” 1. Порядок математической обработки [21]: каждому i -му эксперту ($i = 1, 2, 3 \dots n$), в данном исследовании $n = 111$, необходимо было оценить все предложенные компоненты процесса проведения внутреннего расследования, для которых в дальнейшем будет проводиться экспертная оценка, т.е. каждому эксперту предлагалось установить ранг каждого j -го фактора ($j=1, 2, 3 \dots, k$), в данном исследовании $k = 20$.

Среднее значение модуля оценки j -го фактора по всем экспертам $\bar{a}_j$

$$\bar{a}_j = \frac{\sum_{i=1}^n a_{ij}}{n} \quad (1)$$

a_{ij} – мнение i -го эксперта относительно j -го фактора.

Отклонение мнения каждого эксперта от среднего мнения группы Δa_{ij} (всех экспертов, принимающих участие в опросе) относительно значимости каждого компонента процесса проведения внутреннего расследования:

$$\Delta a_{ij} = |a_{ij} - \bar{a}_j| \quad (2)$$

$\bar{a}_j$ – среднее значение модуля оценки j -того фактора.

Сумма Δa_i отклонений мнений i -того эксперта по всем факторам:

$$\Delta a_i = \sum_{j=1}^k \Delta a_{ij} \quad (3)$$

Среднее отклонение мнений всех экспертов по всем факторам $\bar{\Delta a}$:

$$\bar{\Delta a} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta a_i}{n} \quad (4)$$

Среднее отклонение мнений i -го эксперта по всем факторам от среднего мнения группы:

$$\bar{\Delta a}_i = \bar{\Delta a} - \Delta a_i \quad (5)$$

Δa_i – сумма отклонений мнений i -ого эксперта по всем факторам

Сумма мнений экспертов по j -ому фактору A_j :

$$A_j = \sum_{i=1}^n a_{ij} \quad (6)$$

Среднее значение суммы мнений экспертов по всем факторам :

$$\bar{A}_j = \frac{A_j}{k} \quad (7)$$

Коэффициент конкордации Кенделла

$$W = \frac{12 * S}{n^2(k^2 - k)} \quad (8)$$

где $S = \sum (A_j - \bar{A}_j)^2$

Весовой коэффициент для каждого компонента p_i :

$$p_j = \frac{A_j}{\sum_{j=1}^k A_j} \quad (9)$$

Проведя оценку близости мнений экспертов к среднему мнению и рассчитав коэффициент конкордации Кенделла равный 0,866, можно сделать вывод, что согласованность мнений экспертов является высокой. Данный вывод основан на том, что мнения экспертов не отличаются от среднего более чем на 20%, а коэффициент конкордации Кенделла составляет более 0,7 [22,23]. Результаты анкетирования отражены на рисунке 1.

В таблице 2 представлен фрагмент ранжирования факторов, влияющих на уровень зрелости процесса внутреннего расследования происшествий.

По итогам ранжирования 3 фактора (№6, 17 и 20) имеют значительно менее низкий весовой коэффициент (отклонение от среднего значения более 44 %), что говорит о том, что эксперты не согласны с тем, что данные факторы должны быть включены в последующую оценку зрелости процесса внутреннего расследования происшествий как самостоятельные факторы [24]. Более детальный анализ оценки фактора №20 показан на рисунке 2. На левой диаграмме приведены оценки экспертов российских компаний, на правом – зарубежных. Из анализа видно, что фактор «Международный опыт» не играет ключевую роль для оценки зрелости процесса внутреннего расследования происшествий, поэтому будет исключен из перечня факторов при дальнейшей оценке.

Таблица 2 – Ранжирование факторов методом весовых коэффициентов (фрагмент)

№	Фактор, влияющий на уровень зрелости процесса внутреннего расследования происшествий	Весовой коэффициент	Ранг
...			
6	Состав комиссии по расследования происшествия	2,193	20
7	Компетентность членов комиссии	6,846	1
...			
13	Определение причин	6,846	2
14	Корректирующие мероприятия	6,713	3
...			
17	Проведение тренировок по отработке немедленных действий сотрудников при происшествии	3,656	18
20	международный опыт	2,725	19

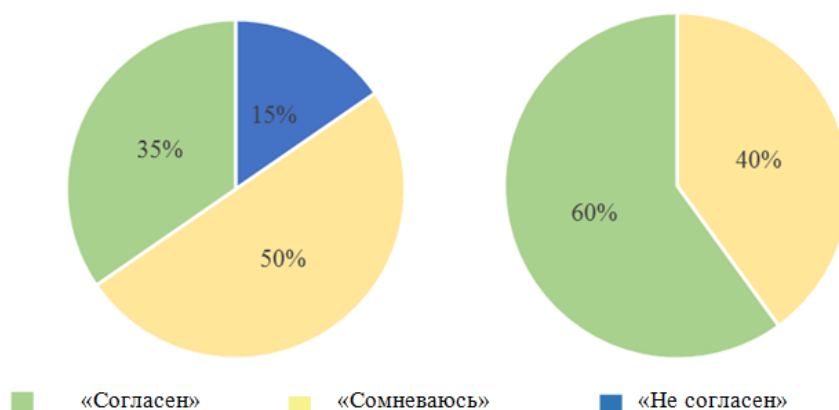


Рисунок 2 – Сравнение оценок экспертов российских и зарубежных компаний по фактору «Международный опыт»

На основании полученной обратной связи от экспертов было принято решение объединить следующие факторы:

- состав комиссии и компетентность членов комиссии (факторы №6 и 7)
- проведение тренировок по отработке немедленных действий сотрудников при происшествии

и оперативность, скорость начала расследования (факторы №3 и 17)

- наличие ЛНД и алгоритм расследования (факторы №1 и 2)

Таким образом, методом экспертных оценок были определены 16 факторов процесса внутреннего расследования происшествий (табл. 3).

Таблица 3 – Факторы процесса внутреннего расследования происшествий

№	Фактор	Характеристика
1	Наличие ЛНД с четкой схемой проведения расследования	Существует ЛНД по внутреннему расследованию понятный и доступный для сотрудников, содержащий визуализированную четкую схему проведения расследования, алгоритм с последовательными шагами и описанием методов расследования
2	Оперативность, скорость начала расследования	Своевременное оповещение заинтересованных сторон, создание приказа о комиссии по расследованию происшествия, отработка немедленных действий сотрудников при происшествии (наличие четкого алгоритма действий, регулярная проверка актуальности данных, имен, номеров телефонов)
3	Возможность прибытия специалиста на место происшествия в кратчайшие сроки	Наличие ресурсов, упрощенного процесса согласования командировок
4	Состав и компетентность членов комиссии по внутреннему расследованию происшествий	Регламентированное количество участников, вовлеченность всех заинтересованных сторон, своевременное и качественное обучение, опыт, непредвзятость, корректность поведения при расследовании
5	Наличие алгоритма сбора информации	Наличие блок-схемы или подробного описания последовательности действий членов комиссии по сбору необходимой информации о происшествии
6	Наличие методологии проведения опросов очевидцев и пострадавших	Применение методов «воронки» и психологии, используемых в криминалистике, наличие готовых форм опроса для пострадавшего, очевидцев и руководителей
7	Лидерство	Отношения между руководителями и работниками выстраиваются так, чтобы сотрудники чувствовали себя комфортно, не опасаясь озвучивать вопросы безопасности, не опасаясь какого-либо наказания за информирование о происшествии или потенциальном происшествии
8	Уверенность работников	Понимание, что главная цель расследования не найти виновного, а определить слабые места в системе управления и разработать мероприятия по ликвидации причин и недопущению однотипных происшествий
9	Обеспеченность ресурсами, необходимыми для проведения расследования	Обеспечение работников материалами, инструментами в полном объеме для проведения расследования
10	Определение причин	Глубина расследования на хорошем уровне, классификация на основные и сопутствующие; непосредственные и системные, коренные причины устанавливаются верно и в полном объеме
11	Корректирующие мероприятия	Корректирующие мероприятия соответствуют коренным причинам и позволяют усиливать барьеры безопасности, не допускать возникновения однотипных происшествий.
12	Наличие порядка обработки материалов расследования, обмена и хранения	Передача информации от других подразделений (кадрового отдела, службы охраны труда и др.), удобство предоставления и обработки этих материалов
13	Автоматизация процесса	Использование программных продуктов для контроля качества процесса расследования, соблюдения алгоритма, порядка обмена и хранения данными, комплексного анализа происшествий
14	Ведение документации	Использование единого формата, бланков, актов, согласующихся с требованиями законодательства
15	Согласованность терминологии с другими бизнес-процессами в т.ч. оценкой риска	Использование единой и понятной терминологии, согласующейся с законодательством Российской Федерации и ЛНД других бизнес-процессов
16	Сроки расследования	Расследование выполняется в установленные сроки. Отсутствие предписаний надзорных органов о несоблюдении сроков расследования

Обсуждение. В статье подчеркивается отсутствие методики определения зрелости процесса внутреннего расследования происшествий. Отправной точкой для создания методологии оценки зрелости процесса внутреннего расследования происшествий были определены факторы и приведена их характеристика.

Для разработки и усовершенствования методики оценки зрелости процесса внутреннего расследования были разработаны следующие рекомендации:

- разработка индикаторов оценки эффективности: Создание набора ключевых метрик или показателей, которые помогут оценить успешность расследования, таких как время начала расследования, время завершения, качество собранных данных, эффективность предпринятых мероприятий и т.д.;

- стандартизация процесса оценки: Создание универсального метода оценки, который может быть адаптирован к различным типам происшествий и специфике организации;

- экспертная оценка: Привлечение экспертов для разработки системы оценки или проведения аудитов процесса расследования для выявления слабых мест и улучшения процедур;

- исследование лучших практик: Анализ аналогичных процессов расследования в других организациях или индустриях для выявления лучших практик и их адаптации к вашему контексту;

- постоянное усовершенствование: Создание механизмов регулярного обновления и улучшения процесса оценки для адаптации к изменяющимся условиям и потребностям.

Разработка методики оценки зрелости процесса внутреннего расследования – необходимый шаг для оценки эффективности и качества расследования происшествий в организации. В дальнейшем можно продолжить улучшать и развивать эту работу, учитывая следующие аспекты:

- валидация анкеты: Проведение тестирования вашей анкеты на большем количестве сотрудников или специалистов в области внутреннего расследования для проверки ее достоверности, надежности и полезности. Получение обратной связи поможет уточнить вопросы и улучшить анкету;

- интеграция обратной связи: Включение в анкету открытых вопросов или возможностей для комментариев, чтобы сотрудники могли выразить свое мнение и предложить улучшения по процессу расследования;

- анализ долгосрочных результатов: Собираение данных оценки зрелости внутреннего расследования на протяжении времени для анализа долгосрочных тенденций. Это позволит выявить изменения, улучшения или ухудшения процесса во времени;

- сравнение с бенчмарками: Сопоставление результатов вашей анкеты с бенчмарками отрасли или сравнение с аналогичными исследованиями других организаций для определения вашей позиции и

обнаружения областей, в которых можно улучшить процессы;

- улучшение методологии оценки: После анализа результатов анкеты можно пересмотреть и доработать методологию оценки, включая новые факторы, улучшение формулировок вопросов или пересмотр шкал оценки;

- применение данных для улучшения практик: Использование полученных результатов для реальных изменений и улучшений в процессах внутреннего расследования. Это поможет закрепить положительные аспекты и устранить слабые места;

- расширение исследования: Рассмотрение возможности расширения анкеты или проведения дополнительных исследований для оценки других аспектов эффективности внутреннего расследования.

Выводы. На основе методов экспертных оценок, анкетирования и математической обработки данных определены 16 факторов, влияющих на уровень зрелости процесса внутреннего расследования происшествий крупных энергетических компаний. Данные факторы используются при мониторинге качества процесса внутреннего расследования происшествий и позволяют своевременно определять слабые стороны, постоянно повышать эффективность данного процесса и снижать возникновение однотипных происшествий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Порядок расследования происшествий / Положение, ПАО «НК «РОСНЕФТЬ» / г. Москва, 2019.
2. СТО Газпром 18000.4-008-2019. Анализ коренных причин происшествий, порядок их установления и разработки мероприятий по предупреждению: стандарт организации ПАО «Газпром»: утвержден и введен в действие Приказом ПАО «Газпром» от 31 мая 2019 г. N 208; введен впервые: разработан авторским коллективом ПАО «Газпром». – Санкт-Петербург: ПАО «Газпром», 2019. – 94 с. // Газпром: сайт. URL: <https://clck.ru/PTrhE> (дата обращения: 05.07.2023).
3. РГ.04.10. Расследование и предоставление информации о происшествиях в области охраны труда и промышленной безопасности: Регламент организации ООО «ИРКУТСКАЯ НЕФТЯНАЯ КОМПАНИЯ», г. Иркутск, 2018.
4. Требования к проведению внутреннего расследования М-16.10-01 версия 1.0 / Методический документ ООО «Газпромнефть-Снабжение» / г. Санкт-Петербург, 2015.
5. ПЗ-05 Р-0778 ЮЛ-183. Порядок расследования происшествий: положение организации ООО «РН-Аэро»: утверждено и введено в действие приказом ООО «РН-Аэро» от 15 февраля 2017 г. N 138. – Москва: ПАО «НК «Роснефть», 2017. – 83 с. // Роснефть-Аэро: офиц. сайт. URL: clck.ru/34HkGU (дата обращения: 05.08.2023).
6. IOGP Safety performance indicators - 2022 data. // International Association of Oil and Gas producers. – 2023 / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://www.iogp.org/bookstore/product/safety-performance-indicators-2022-data/> (дата обращения 04.05.2023)
7. Герасимов, А.Н. Понятие «профессиональный риск» в рамках страхования от несчастных случаев на производстве в Российской Федерации // Перспективы социально-экономического развития в XXI столетии: инновационные, финансовые и правовые аспекты: Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. Магнитогорск, 2019. – С. 278-281.
8. Щипанов, А.В. Применение процессного подхода при разработке документационного обеспечения системы управления промышленной безопасностью в организации // Безопасность труда в промышленности. – 2022. – № 3. – С. 46-54. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-3-46-54.

9. bp Operation Management System Framework. – bp. – 2016 – 35 p. // bp.com: сайт. URL: <https://www.bp.com/en/global/corporate/sustainability/safety.html> (дата обращения: 11.05.2023).

10. Никитина, Д.А. Анализ опыта построения систем управления производственной деятельностью иностранных и российских нефтегазовых компаний / Д.А. Никитина, С.Н. Петряев, И.С. Сивоконь, Е.Е. Фомина // Безопасность труда в промышленности. – 2021. – № 2. – С. 69-74.

11. Кузнецова, Е. А. Методы расследования происшествий и аварий в линейных и нелинейных системах // Экономика, предпринимательство и право. – 2020. – № 12. – doi: 10.18334/err.10.12.111379.

12. Муртузова, Д.Х. Оценка несчастных случаев // Научно-практический электронный журнал Аллея Науки. – 2019. – № 5(32). – С. 789-94.

13. Смагина, А.Н. Обстоятельства и установление причин несчастного случая на деревообрабатывающем предприятии // Проблемы обеспечения безопасности: I Международная научно-практическая конференция/ Смагина А.Н., Зайнутдинова А.Ф., Кострюкова Н.В. Уфа, 2019. – С. 175-183.

14. Тхорь, М.Е. Анализ несчастных случаев на производстве на основе теории Хенриха // Форум молодых ученых. – 2019. – № 6(34). – С. 1178-1182.

15. Adelstein A.M. Accident-proneness: a criticism of the concept based upon an analysis of shunter's accidents // Journal of Royal Statistical Society. – 1952. – № 3. – P. 354-410.

16. Anderson J.R. Methodologies for studying human knowledge // Behavioral and Brain Sciences. – 1998. – № 3. – P. 467-477. – doi: 10.1017/S0140525X00023554.

17. Arbous A.G., Kerrich J.E. Accident statistics and the concept of accident-proneness // Biometrics. – 1951. – № 4. – P. 340-432.

18. Hale A.R., Hale M. Accidents in perspective // Occupational Psychology. – 1970. – P. 115-122.

19. Shappell S.A., Wiegmann D.A. Applying reason: the human factors analysis and classification system (HFACS) // Human Factors and Aerospace Safety. – 2001. – P. 59-86.

20. Attwood D., Khan F., Veitch B. Occupational accident models-Where have we been and where are we going? // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2006. – P. 664-682.

21. Сидоренко, Е.В. Методы математической обработки в психологии. – СПб.: ООО «Речь», 2000. – 350 с., ил.

22. Ермолаев, О.Ю. Математическая статистика для психологов. Учебник/ О.Ю. Ермолаев – 2-е изд. испр. – М.: Московский психолого социальный институт Флинта, 2003. – 336 с.

23. Messick S. Validity // Educational measurement / R. L. Linn (Ed.). 3rd ed. New York: Macmillan, 1989. – P. 13-103.

24. Просветов, Г.И. Теория вероятностей и математическая статистика: задачи и решения. Учебно-практическое пособие / Г. И. Просветов. - Москва: Альфа-Пресс, 2015. – 268 с.

Статья поступила в редакцию 13.02.2024

Статья принята к публикации 15.03.2024

УДК 504.3.054; 543.054

EDN: XUPVRA

ВЫБОР СОРБИРУЮЩИХ СРЕД ДЛЯ ПАССИВНОГО ОТБОРА ПРОБ ОКСИДА УГЛЕРОДА

© Автор(ы) 2024

SPIN-код 6169-8590

РИНЦ Author ID 448228

ORCID ID: 0000-0002-1313-6826

Researchgate ID: 6701807193

Scopus ID: 55895350100

Web of Science Researcher ID P-7345-2015

ТАРАНЦЕВА Клара Рустемовна, доктор технических наук,
профессор, заведующая кафедрой «Биотехнологии и техносферная безопасность»

Пензенский государственный технологический университет

(440039, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11, E-mail: krtar2018@bk.ru)

ХУДОЙБЕРДИЕВ Максуджон Саиджон-Угли, аспирант,

кафедры «Биотехнологии и техносферная безопасность»

Пензенский государственный технологический университет

(440039, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11, E-mail: khudoyberdiev@gmail.com)

SPIN-код: 8457-4150

РИНЦ Author ID: 362309

Scopus ID: 57216616022

КУРОЧКИНА Ольга Геннадьевна, кандидат сельскохозяйственных наук,

доцент кафедры «Биотехнологии и техносферная безопасность»

Пензенский государственный технологический университет

(440039, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11, E-mail: kog36@mail.ru)

Аннотация. Загрязнение атмосферного воздуха в результате выбросов оксида углерода (CO) в атмосферу промышленными предприятиями и коммунальным хозяйством создает потенциальную экологическую угрозу для человека и окружающей среды. Для обеспечения экологической безопасности человека необходимо проведение экологического мониторинга, путем определения не только максимально разовых концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, но и среднесуточных концентраций. Определение среднесуточных концентраций оксида углерода по используемым в настоящее время методикам требует длительного отбора проб, и трудоемко. Между тем определение среднесуточной концентрации оксида углерода может быть достаточно легко реализовано с применением пассивного метода отбора, основанного на сорбции загрязняющего вещества в пробоотборнике. В котором в качестве сорбирующей среды используется хлорид палладия. Однако, палладий является дорогостоящим металлом, поэтому актуален поиск более дешевых сорбирующих материалов для пассивного отбора проб оксида углерода (CO) в атмосферном воздухе. Авторами статьи была исследована возможность использования медно-аммиачных растворов с гидрокарбонатом меди и хлоридом меди (I), а также триэтаноламиновых растворов с гидрокарбонатом меди и хлоридом меди (I) для улавливания и количественного определения CO пассивным методом. Установлено, что аммиачные и триэтаноламиновые растворы солей меди связывают оксид углерода и могут быть использованы в качестве сорбентов в пассивном методе отбора проб. При этом, использование медно-аммиачных растворов с гидрокарбонатом меди и хлоридом меди (I) рекомендуется при использовании спектрофотометрических методов анализа. Применение триэтаноламиновых растворов с хлоридом меди (I) и гидрокарбонатом меди, в качестве сорбирующих растворов, перспективно для качественного экспресс определения CO методом тонкослойной хроматографии.

Ключевые слова: экологический мониторинг, оксид углерода (CO), среднесуточная концентрация, пассивный метод, сорбирующие среды, медно-аммиачные растворы, триэтаноламиновые растворы.

SELECTION OF SORBENT MEDIA FOR PASSIVE CARBON OXIDE SAMPLING

© The Author(s) 2024

TARANTSEVA Klara Rustemovna, doctor of technical sciences,
professor, head of the Department of Biotechnology and Technosphere Safety

Penza State Technological University

(440039, Penza, Baidukova proezd/Gagarina st., 1a/11, E-mail: krtar2018@bk.ru)

KHUDOBERDIEV Maksudzhon Saidzhon-Ugli, graduate student

Department of Biotechnology and Technosphere Safety

Penza State Technological University

(440039, Penza, Baidukova proezd/Gagarina st., 1a/11, E-mail: khudoyberdiev@gmail.com)

KUROCHKINA Olga Gennadievna, candidate of agricultural sciences,
associate professor of the Department of Biotechnology and Technosphere Safety

Penza State Technological University

(440039, Penza, Baidukova proezd/Gagarina st., 1a/11, E-mail: kog36@mail.ru)

Abstract. Atmospheric air pollution as a result of emissions of carbon monoxide (CO) into the atmosphere by industrial enterprises and utilities creates a potential environmental threat to humans and the environment. To ensure human environmental safety, it is necessary to conduct environmental monitoring by determining not only the maximum one-time concentrations of pollutants in the atmospheric air, but also the average daily concentrations. Determining average daily carbon monoxide concentrations using currently used methods requires lengthy sampling and is labor-intensive. Meanwhile, the determination of the average daily concentration of carbon monoxide can be quite easily implemented using a passive sampling method based on the sorption of the pollutant in the sampler. In which palladium chloride is used as a sorption medium. However, palladium is an expensive metal, so the search for cheaper sorbing materials for passive sampling of carbon monoxide (CO) in atmospheric air is relevant. The authors of the article investigated the possibility of using copper-ammonia solutions with copper hydroxycarbonate and copper (I) chloride, as well as triethanolamine solutions with copper hydroxycarbonate and copper (I) chloride to capture and quantify CO using a passive method. It has been established that ammonia and triethanolamine solutions of copper salts bind carbon monoxide and can be used as sorbents in the passive sampling method. At the same time, the use of copper-ammonia solutions with copper hydroxycarbonate and copper (I) chloride is recommended when using spectrophotometric methods of analysis. The use of triethanolamine solutions with copper (I) chloride and copper hydroxycarbonate as sorbing solutions is promising for the qualitative express determination of CO using thin-layer chromatography.

Keywords: environmental monitoring, carbon monoxide (CO), average daily concentration, passive method, sorbing media, copper-ammonia solutions, triethanolamine solutions.

Для цитирования: Таранцева К.Р. Выбор сорбирующих сред для пассивного отбора проб оксида углерода / К.Р. Таранцева, М.С.-У Худойбердиев., О.Г. Курочкина // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 1(65). – С. 248-254. – EDN: XUPVRA.

Введение. Оксид углерода (CO), поступая в кровь вместе с воздухом, конкурирует с кислородом за молекулы гемоглобина и нарушает способность крови доставлять кислород к тканям, вызывая спазмы сосудов, головную боль, а при высоких концентрациях, потерю сознания и смерть. В связи с этим необходим контроль его содержания в атмосферном воздухе.

В настоящее время используются методики определения максимально разовой концентрации оксида углерода в атмосферном воздухе с помощью газовой хроматографии (ГХ) или газоанализаторов [1-3]. В то же время, документами [4] и [5] установлены требования, предусматривающие определение не только максимально разовых концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, но и среднесуточных концентраций. Определение среднесуточных концентраций оксида углерода по существующим методикам требует длительного отбора проб, что трудоемко, а порой и невозможно.

Между тем отбор среднесуточной концентрации оксида углерода достаточно легко реализуется с применением пассивного метода отбора, широко применяемого за рубежом, и основанного на сорбции загрязняющего вещества в пробоотборнике [6 - 10].

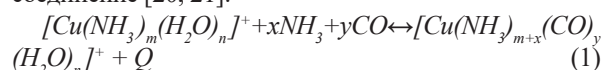
В отечественной практике существуют требования по выбору, использованию и техническому обслуживанию диффузионных (пассивных) пробоотборников, в которых приведен перечень загрязняющих веществ и сорбирующих материалов [11]. Однако в данном перечне веществ отсутствует оксид углерода [12-18]. Поиск зарубежных аналогов, показал, что для этих целей применяется диффузионный пробоотборник, в котором в качестве поглощающей среды используется хлорид палладия [19]. Однако,

палладий является дорогостоящим металлом, поэтому актуальным является поиск более дешевых сорбирующих материалов для пассивного отбора проб оксида углерода в атмосферном воздухе.

Целью данной работы является поиск сорбирующего материала для пассивного отбора проб оксида углерода в атмосферном воздухе.

Методология. Спектрофотометрический метод анализа, метод тонкослойной хроматографии (ТСХ), метод газовой хроматографии (ГХ). Для проведения исследований использовались: фотометр «КФК-3-01»; пластины «sorbfil»; газовый хроматограф «Хроматэк-Кристалл».

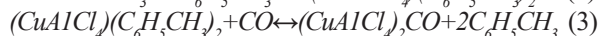
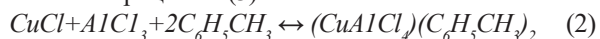
Согласно литературным данным оксид углерода хорошо абсорбируется медно-аммиачным раствором. В частности, таким образом, решается проблема очистки водорода, используемого для синтеза аммиака. В этом процессе CO под высоким давлением поглощается в противоточном абсорбере раствором медно-аммиачного комплекса, образуя новое соединение [20, 21]:



Одним из способов получения медно-аммиачного комплекса является растворение гидросокарбоната меди в аммиаке [22, с. 25]. Чаще используют растворы формиата, карбоната или ацетата меди [21]. Также известно, что хлорид меди (I) в аммиаке или в солянокислом растворе образует комплексное соединение, которое хорошо абсорбирует оксид углерода [23-25].

При наличии в газе O₂ и больших количеств CO₂, абсорбцию проводят медь-алюминий-хлоридным раствором [21, 25]. Процесс очистки основан на

химической абсорбции CO раствором смешанной соли тетрагидрида меди и алюминия в различных ароматических углеводородах с образованием комплекса. Для этих целей используют медь-алюминий-хлоридный раствор, содержащий 20-50% $CuAlCl_4$ и 50-80% толуола [21, 26]. В данной реакции вначале происходит образование комплекса абсорбента (2) и затем абсорбция III (3):



Добавление к медно-аммиачным растворам метанола, этанола, этиленгликоля или глицерина увеличивает их абсорбционную способность [21].

На практике для пассивного отбора проб диоксида азота, диоксида серы и ряда других кислых газов используют поглотительные растворы на основе триэтаноламина [27-29]. Триэтаноламин, производный аммиака, способен образовывать комплексные соединения со многими металлами и в том числе с медью [30, 31]. В отличие от аммиака, триэтаноламин является более вязкой и не летучим основанием, поэтому наиболее подходит для пассивного метода отбора проб.

С учетом имеющихся теоретических и практических данных в исследуемой области, для выполнения поставленной цели решено было исследовать возможность использования медно-аммиачных растворов с гидрокарбонатом меди и хлоридом меди (I), а также триэтаноламиновых растворов с гидрокарбонатом меди и хлоридом меди (I) для улавливания и количественного определения CO пассивным методом.

Результаты и их обсуждение. Медно-аммиачные растворы с гидрокарбонатом меди и хлоридом меди (I). Оксид углерода получали смешиванием муравьиной кислоты с серной кислотой при нагревании. Медно-аммиачные растворы получали следующим образом. Вначале получали гидрокарбонат меди, путем высушивания осадка в сушильном шкафу при $\approx 100^\circ C$, образовавшегося при растворении 5 г сульфата меди ($CuSO_4$) в 25 мл дистиллированной воды после добавления 1 г соды ($NaHCO_3$). Из полученной соли меди ($(CuOH)_2CO_3$)

был приготовлен медно-аммиачный раствор, для этого 0,05 г $(CuOH)_2CO_3$ растворили в 2 мл 20%-го аммиака (NH_3). Из раствора отобрали 1 мл в пробирку и довели дистиллированной водой до 10 мл.

Далее, при помощи спектрофотометра «КФК-3-01» был снят спектр медно-аммиачного комплекса до и после барботирования его оксидом углерода. Спектр измеряли в диапазоне длин волн от 310 до 950 нм, с шагом 10 нм. По результатам измерений были построены кривые зависимости значений оптической плотности (D , ед. опт. пл.) от длины волны (λ , нм), в которых они регистрировались (рис. 1). Как видно из представленных данных, в растворе после барботирования CO , регистрируется наибольшая оптическая плотность 0,9 единиц, на длине волны 320 нм, тогда как в исходном растворе оптическая плотность при данной длине волны составляет 0,3 единицы. Второй пик, в растворе после барботирования CO , также выше и составляет 0,65 единиц на длине волны 630 нм, тогда как в исходном растворе данная величина составляет 0,3 единицы при той же длине волны.

Отсюда можно сделать вывод, что медно-аммиачный комплекс может являться индикатором CO в пассивном пробоотборнике.

В качестве следующего сорбирующего раствора, исследовали медно-аммиачный раствор с хлоридом меди (I).

Медно-аммиачный раствор с хлоридом меди (I) ($CuCl$) готовили аналогично, как и раствор гидрокарбоната меди ($(CuOH)_2CO_3$). Спектры медно-аммиачного раствора с хлоридом меди (I) до и после барботирования измеряли в диапазоне длин волн от 310 до 950 нм с шагом 10 нм. Результаты измерений показали, что в данном сорбирующем растворе наибольшая оптическая плотность до барботирования в растворе регистрировалась на длине волны 320 нм (0,55 единиц оптической плотности), после барботирования на длине волны 610-620 нм (1,1 единиц оптической плотности). Полученные данные подтверждают возможность использования данного раствора в пассивном пробоотборнике в качестве индикатора CO (рис. 2).

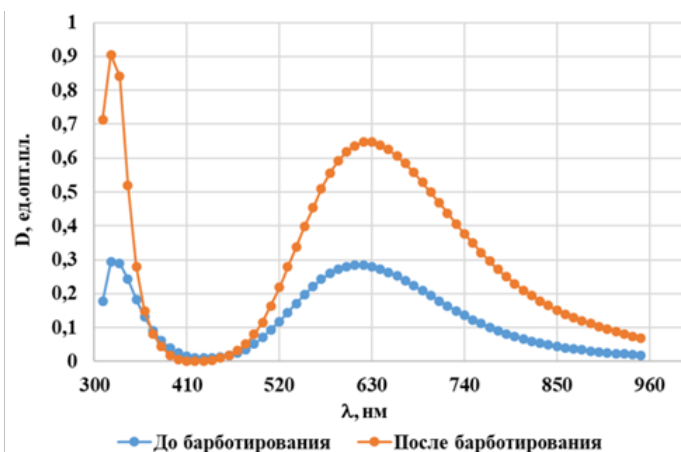


Рисунок 1 – Спектры медно-аммиачного раствора с гидрокарбонатом меди до и после барботирования

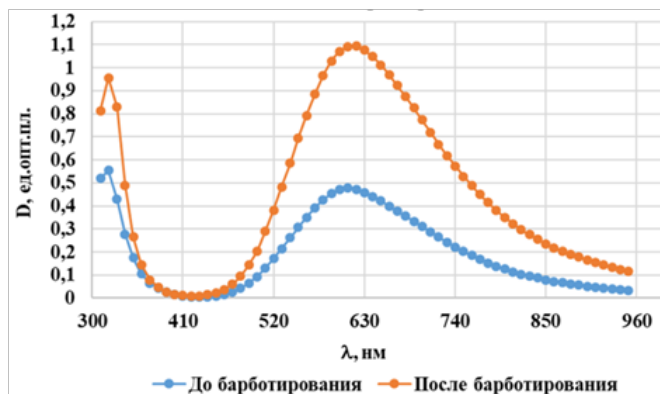


Рисунок 2 – Спектры медно-аммиачного раствора с хлоридом меди (I) до и после барботирования

Триэтаноламиновые растворы с гидроксокарбонатом меди и хлоридом меди (I) готовили следующим образом: 0,05 г $(\text{CuOH})_2\text{CO}_3$ и 0,05 г CuCl растворили в 5 мл триэтанолamina при нагревании. Для придания растворам меньшей вязкости, после растворения солей меди, в каждый раствор было добавлено по 10 мл дистиллированной воды и измерены спектры до и после их барботирования оксидом углерода (рис. 3, 4).

Как видно из спектров, представленных на рисунке 3, в триэтаноламиновом растворе с хлоридом меди (I) не удастся спектрофотометрическим методом зарегистрировать образование новых соединений после барботирования его CO . В данном растворе наибольшая оптическая плотность в обоих случаях зарегистрирована на длине волны 350 нм.

В триэтаноламиновом растворе с гидроксокарбонатом меди (рис. 4) наибольшая оптическая плотность до барботирования регистрируется на длине волны 340 нм (0,85 единиц оптической плотности), после барботирования на длине волны 330 нм (1,15 единиц оптической плотности).

Поскольку спектрофотометрическим методом не удалось определить образование новых соединений в триэтаноламиновом растворе с хлоридом меди (I) и гидроксокарбонатом меди при продувке их оксидом углерода, для этих целей была исследова-

на возможность применения метода тонкослойной хроматографии (ТСХ) для качественного определения CO . Метод ТСХ во многих случаях позволяет проводить качественный экспресс-анализ и является более доступным по сравнению со спектрофотометрическим методом. Параллельно была исследована возможность применения ТСХ для качественного определения новых соединений в аммиачном растворе хлорида меди после продувки его оксидом углерода.

Для проведения ТСХ применяли пластины «*sorbfil*», в качестве подвижной фазы использовали 1%-ный раствор ацетата аммония. Перед нанесением на пластины триэтаноламиновый раствор с хлоридом меди (I) и медно-аммиачный раствор с гидроксокарбонатом меди были обработаны ализарин-комплексом. Ализарин-комплекс наносился на пластину также в качестве контроля. Пластины с нанесенными на нее триэтаноламиновым раствором с хлоридом меди (I), медно-аммиачным раствором с гидроксокарбонатом меди и контролем помещали в камеру с 1%-ным раствором ацетата аммония. На хроматограммах видно, что наибольшее удаление от старта и заметные полосы пятен показывают необработанные оксидом углерода аммиачный раствор хлорида меди (I), аммиачный раствор гидроксокарбоната меди и ализарин-комплекс (рис. 5).

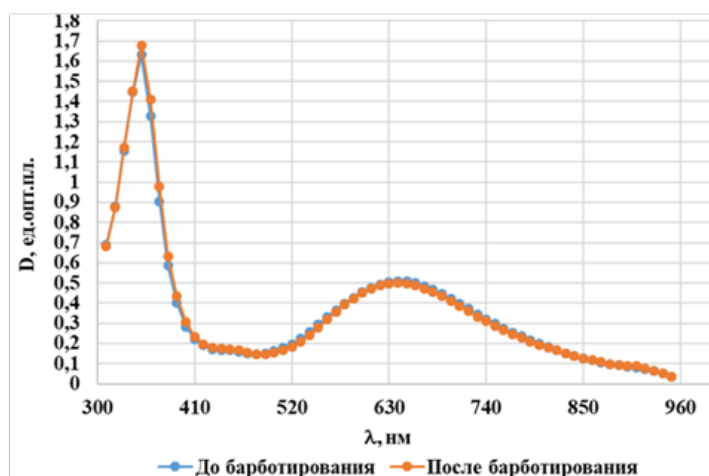


Рисунок 3 – Спектры триэтаноламинового раствора с хлоридом меди (I) до и после барботирования

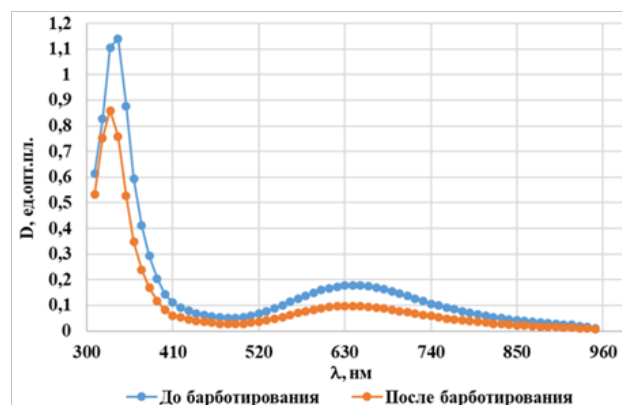


Рисунок 4 – Спектры триэтаноламинового раствора с гидроксокарбонатом меди до и после барботирования



Рисунок 5 – Хроматограммы исходные (а) и после разделения (б): аммиачный раствор хлорида меди после продувки оксидом углерода (1,б) и без продувки (2,б); аммиачный раствор гидроксокарбоната меди после продувки оксидом углерода (3,б) и без продувки (4,б); ализарин-комплексон (5)

Обработанные оксидом углерода сорбирующие растворы остались на старте. Мало заметные полосы от точек (1) и (3) представляют собой остатки ализарин-комплексона, не встроившегося в координационную сферу новых соединений, полученных после обработки растворов. Исходя из полученных результатов можно сделать вывод, что метод ТСХ позволяет провести качественную оценку образования новых соединений при продувке медно-аммиачных растворов оксидом углерода.

На рисунке 6 представлены хроматограммы с нанесенными на пластины «sorbfil» триэтанол-

аминовыми растворами.

Согласно полученным результатам выявлены заметные отличия на хроматограммах для сорбирующих растворов до и после продувки оксидом углерода, что проявляется в удаленности от старта полос не обработанных растворов (2) и (4). Таким образом, метод тонкослойной хроматографии (ТСХ) может быть использован для качественного экспресс определения CO с помощью триэтаноламиновых растворов с хлоридом меди (I) и гидроксокарбонатом меди, предложенных в качестве сорбирующих растворов.

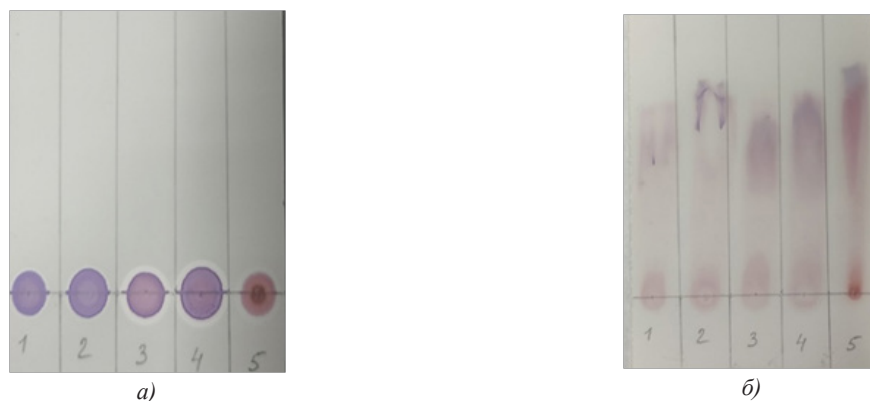


Рисунок 6 – Хроматограммы исходные (а) и после разделения (б): триэтаноламиновый раствор хлорида меди после продувки оксидом углерода (1,б) и без продувки (2,б); триэтаноламиновый раствор гидроксокарбоната меди после продувки (3,б) и без продувки (4,б); ализарин-комплексон (5)

Выводы. Установлено, что аммиачные и триэтаноламиновые растворы солей меди связывают оксид углерода и могут быть использованы в качестве сорбентов в пассивном методе отбора проб.

Использование медно-аммиачных растворов с гидрокарбонатом меди и хлоридом меди (I) рекомендуется при использовании спектрофотометрических методов анализа.

Применение триэтаноламиновых растворов с хлоридом меди (I) и гидрокарбонатом меди, в качестве сорбирующих растворов, перспективно для качественного экспресс определения CO методом тонкослойной хроматографии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. РД 52.04.186-89 «Руководство по контролю загрязнения атмосферы» (утв. Госкомгидрометом СССР 01.06.1989, Главным государственным санитарным врачом СССР 16.05.1989).
2. ПНД Ф 13.1:2.3.27-99 «Методика выполнения измерений массовых концентраций оксида углерода и метана в атмосферном воздухе, воздухе рабочей зоны и промышленных выбросах методом реакционной газовой хроматографии» (утв. Заместителем Председателя Государственного комитета РФ по охране окружающей среды 27.03.1999).
3. РД 52.04.909-2021 «Массовая концентрация оксида углерода в пробах атмосферного воздуха. Методика измерений с отбором проб воздуха в пробоотборные пакеты» (утв. Руководителем Росгидромета 18.01.2021).
4. ГОСТ 17.2.3.01-86. Охрана природы. Атмосфера. Правила контроля качества воздуха населенных пунктов.
5. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».
6. Ambient Ammonia Concentrations Across New York State / Chuanlong Zhou, Hao Zhou, Thomas M. Holsen, Philip K. Hopke, Eric S. Edgerton, James J. Schwab // JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH: ATMOSPHERES. – 2019. – Vol. 124. – No 14. – P. 8287-8302. – DOI 10.1029/2019JD030380.
7. Ambient air monitoring around the dioxin remediation site in Da Nang, Vietnam, using passive air samplers / T. K. Sau, T. Le Lan Anh, N. X. Truong [et al.] // Environmental Monitoring and Assessment. – 2021. – Vol. 193. – No 7. – DOI 10.1007/s10661-021-09223-7. – EDN MJGBAH.
8. Abad, E. Air monitoring with passive samplers for dioxin-like persistent organic pollutants in developing countries (2017–2019) / E. Abad, M. Abalos, H. Fiedler // Chemosphere. – 2022. – Vol. 287. – P. 131931. – DOI 10.1016/j.chemosphere.2021.131931. – EDN FPFRCF.
9. Characterization and Local Emission Sources for Ammonia in an Urban Environment / D. Galán Madruga, R. Fernández Patier, M. A. Sintes Puertas [et al.] // Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. – 2018. – Vol. 100. – No 4. – P. 593-599. – DOI 10.1007/s00128-018-2296-6. – EDN YGUOQH.
10. Using Passive Air Samplers to Quantify Vertical Gaseous Elemental Mercury Concentration Gradients Within a Forest and Above Soil / M. Isabel Quant, Michelle Feigis, Shreya Mistry, Ying Duan Lei, Carl P. J. Mitchell, Ralf Staebler, Antonio Di Guardo, Elisa Terzaghi, Frank Wania // JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH: ATMOSPHERES. – 2021. – Vol. 126. – No 15. – DOI 10.1029/2021JD034981.
11. ГОСТ Р EN 13528-3-2010 Качество атмосферного воздуха. Диффузионные пробоотборники, используемые при определении содержания газов и паров. Требования и методы испытаний. Часть 3. Руководство по выбору, использованию и техническому обслуживанию.
12. Амирова, З.К. Применение метода пассивного пробоотбора для мониторинга стойких органических загрязнителей в районах уничтожения химического оружия и военных действий / З.К. Амирова, Э.А. Крутлов, И. Я. Шахтамиров // Теоретическая и прикладная экология. – 2010. – № 2. – С. 31-36. – EDN MVOKAR.
13. Поддубный, В.А. Метод пассивного отбора проб для измерений диоксида азота в атмосферном воздухе / В.А. Поддубный, Н.А. Юшкетова // Оптика атмосферы и океана. – 2013. – Т. 26. – № 9. – С. 759-765. – EDN QZQFSJ.
14. Пассивный отбор в анализе диоксинов в атмосферном воздухе г.Москвы / Г.Г. Финаков, Е.А. Белинская, Г.В. Зыкова, С.Ю. Семенов // Medline.ru. Российский биомедицинский журнал. – 2015. – Т. 16. – С. 278-284. – EDN TVMSQN.
15. Халиков И.С., Сурнин В.А. Сравнение дискретного и непрерывного режима отбора проб аэрозольных частиц при определении ПАУ в воздухе г. Обнинска. – Вопросы образования и науки: сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции 30 июня 2015 г. - Том 5. Тамбов: ООО «Консалтинговая компания Юком», 2015. – С. 150-151.
16. Кузнецов В.А. Пассивная дозиметрия состояния атмосферного воздуха в лесных экосистемах на урбанизированных территориях / В.А. Кузнецов, О.В. Беднова // Снежный покров, атмосферные осадки, аэрозоли: климат и экология северных территорий и Байкальского региона: Материалы 1-й международной научно-практической конференции, Иркутск, 26-29 июня 2017 года / Иркутский национальный исследовательский технический университет. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2017. – С. 177-180. – EDN XEO-DJC.
17. Булаева, В.В. Определение содержания соединений кальция и аммиака в воздухе методом пассивной дозиметрии / В.В. Булаева, К.Ю. Комстачев, В.А. Кузнецов // Успехи в химии и химической технологии. – 2019. – Т. 33, № 2(212). – С. 9-11. – EDN HBZQRL.
18. Бучельников В.С. Опыт использования пассивных пылеаэрозольных станций для оценки экологического состояния атмосферного воздуха (на примере обсерватории "Фоновая") / В.С. Бучельников ; науч. рук. Е.Г. Язиков, А.В. Таловская, М.П. Тентюков // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXIV Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 75-летию Победы в Великой Отечественной войне, Томск, 6-10 апреля 2020 г.: в 2 т. – Томск: Изд-во ТПУ, 2020. – Т. 1. – С. 565-566.
19. Florentina Villanueva, Milagros Ródenas, Aime Ruus, John Saffell & Marta F. Gabriel (2021): Sampling and analysis techniques for inorganic air pollutants in indoor air, Applied Spectroscopy Reviews, DOI: 10.1080/05704928.2021.2020807.
20. Родионов, А.И. Охрана окружающей среды: процессы и аппараты защиты атмосферы: учебник для среднего профессионального образования / А.И. Родионов, В.Н. Клушин, В.Г. Систер. – 5-е изд., испр. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2023. – 201 с.
21. «ИТС 22-2016. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Очистка выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух при производстве продукции (товаров), а также при проведении работ и оказании услуг на крупных предприятиях» (утв. Приказом Росстандарта от 15.12.2016 N 1880).
22. Научные основы приготовления катализаторов. Творческое наследие и дальнейшее развитие работ профессора И.П. Кириллова: монография / под ред. А.П. Ильина; ГОУ ВПО Иван. гос.хим.-технол.ун-т. – Иваново, 2008. – 156 с.
23. Неорганические синтезы / Пер. с англ. Е.А. Терентьевой; Под ред. проф. Д.И. Рябчикова. Сб. 1-. Сб. 2: / Пер. М.М. Богословского и Е.А. Терентьевой. – 1951. – 252 с.
24. Губен-Вейль. Методы органической химии. Том 2. Методы анализа Пер.с нем. Издание 2-е, стереотипное. М. Химия 1967 г.
25. Рипан Р., Четяну И. Неорганическая химия. Том 2. Химия металлов. М.: Мир, 1972. – 872 с. (Пер. с румынского)
26. Клошенко, М.И. Защита окружающей среды от промышленных газовых выбросов: учебное пособие / М.И. Клошенко, А.В. Луканин. – Москва: ИНФРА-М, 2020. – 142 с.
27. Kasper-Giebl A., Krenn S., Puxbaum H. Laboratory and field measurements of a badge type passive sampler for the determination of ambient sulfur dioxide concentrations. Fres J Anal Chem. 363 (1999).

28. Plaisance H., Sagnier I., Saison J.Y. et al. Performance and application of a passive sampling method for the simultaneous determination of nitrogen dioxide and sulfur dioxide in ambient air. *Env. Monit. Ass.* 79 (2002).

29. Palmes E.D., Gunnison A.F. Personal sampling for nitrogen dioxide // *American Industrial Hygiene Association Journal*. – 1976. – P. 570-577.

30. Воронов В.К., Дударева О.В., Фунтикова Е.А. Исследования комплексов $ZnCl_2$ и $CDCl_2$ с триэтаноламином методами спектроскопии ЯМР и квантовой химии // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. – 2020. – №4 (35).

31. Пршибил, Р. Комплексоны в химическом анализе. Пер. с чешск. Ю.И. Вайнштейн; под ред. проф. д-ра хим. наук Ю.Ю. Лурье. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1960.

Статья поступила в редакцию 10.01.2024

Статья принята к публикации 15.03.2024

УДК 614.8

EDN: YOZPNC

**МОДЕЛИРОВАНИЕ, ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ, СВЯЗАННЫХ
С ЛЕСНЫМИ ПОЖАРАМИ**

© Автор(ы) 2024

SPIN: 5092-6494

AuthorID: 131728

ORCID: 0000-0002-3054-1786

ScopusID: 6508255564

БАДЕНКО Владимир Львович, доктор технических наук, доцент,
профессор высшей школы гидротехнического и энергетического строительства
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
(Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, vbadenko@gmail.com)

SPIN: 4611-1144

AuthorID: 108184

ORCID: 0000-0001-6139-8719

ScopusID: 7101634822

ФЕДОРОВ Михаил Петрович, 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, 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
(Россия, 195251, 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
(Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, asminaster7@gmail.com)

Аннотация. Моделирование экстремальных явлений – сложная задача, требующая участия множества междисциплинарных команд, обладающих опытом из самых разных областей. Одним из важнейших экстремальных явлений, влияющих на глобальный климат сегодня, являются лесные пожары. В работе рассмотрен вопрос о моделировании лесных пожаров в среде геоинформационных систем (ГИС) с использованием технологий дистанционного зондирования Земли, а также имитационной модели пожаров для прогнозирования развития пожара и оценки различных последствий лесных пожаров для природной среды обитания и среды обитания человека. В статье представлены некоторые результаты тематического исследования в Ленинградской области, Россия. Для решения проблемы прогнозирования развития пожаров была предложена систематизированная процедура сопряжения существующих ГИС и программ моделирования лесных пожаров. Тематическое исследование иллюстрирует преимущества предложенного подхода, а результаты демонстрируют эффективность предлагаемого подхода. Предлагаемый подход должен помочь лицам, принимающим решения, подойти к моделированию и процессу принятия решений о лесных пожарах.

Ключевые слова: лесные пожары, моделирование, прогнозирование, оценка, опасные явления.

**MODELING, FORECASTING AND ASSESSMENT OF HAZARDOUS PHENOMENA
ASSOCIATED WITH FOREST FIRES**

© The Authors 2024

BADENKO Vladimir Lvovich, doctor of technical sciences, associate professor,
professor of the Higher School of Hydraulic and Energy Construction
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
(Russia, 195251, St. Petersburg, st. Politekhnikeskaya, 29)

FEDOROV Mikhail Petrovich, doctor of technical sciences, professor,

professor of the Higher School of Hydraulic and Energy Construction
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
(Russia, 195251, St. Petersburg, st. Politekhnikeskaya, 29, m.fedorov@spbstu.ru)

MASLIKOV Vladimir Ivanovich, 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. Politekhnikeskaya, 29, vmaslikov@list.ru)

MOLODKINA Lyudmila Mikhailovna, doctor of technical sciences, professor,
professor of the Higher School of Hydraulic Engineering and Energy Construction
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
(Russia, 195251, St. Petersburg, st. Politekhnikeskaya, 29, asminaster7@gmail.com)

Abstract. Modeling extreme events is a complex task that requires the participation of many interdisciplinary teams with expertise from a wide variety of fields. One of the most important extreme events affecting the global climate today is forest fires. The paper considers the issue of modeling forest fires in the environment of geographic information systems (GIS) using Earth remote sensing technologies, as well as a fire simulation model for predicting fire development and assessing various consequences of forest fires for the natural habitat and human habitat. The article presents some results of a case study in the Leningrad region, Russia. To solve the problem of forecasting the development of fires, a systematic procedure for combining existing GIS and forest fire modeling programs was proposed. The case study illustrates the advantages of the proposed approach, and the results demonstrate the effectiveness of the proposed approach.

Keywords: forest fires, modeling, forecasting, assessment, hazardous phenomena.

Для цитирования: Баденко В.Л. Моделирование, прогнозирование и оценка опасных явлений, связанных с лесными пожарами / В.Л. Баденко, М.П. Федоров, В.И. Масликов, Л.М. Молодкина // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 1(65). – С. 255-262. – EDN: YOZPNC.

Введение. Лесные пожары и другие экстремальные явления, такие как ураганы, наводнения и землетрясения, происходят практически ежедневно по всему миру [1-3]. Они представляют собой одну из самых опасных, пагубных и постоянных проблем, с которыми сталкивается все человечество. Лицам, принимающим решения на всех уровнях, необходимо получать актуальную информацию об экстремальных событиях [4-6]. Для решения этих задач мы предлагаем использовать географические информационные системы (ГИС) и средства компьютерного моделирования [7-9]. Большинство экстремальных явлений трудно смоделировать, поскольку они являются результатом сложного взаимодействия биологических, физических, метеорологических, топографических и социальных факторов [10-12]. В России, обладающей обширной территорией, своевременное реагирование на экстремальные явления является сложной проблемой.

Лесные регионы России подвержены обширным пожарам. За последнее десятилетие выгоревшие площади в районе бореальных лесов России составили в среднем 7 млн га в год. Пожары в бореальном регионе очень крупные и удаленные. Кроме того, лесные пожары появляются неожиданно. Из-за этого пространственное планирование противопожарных мероприятий, развертывание, эвакуация людей в пострадавшем регионе, наблюдение за местами, рассредоточенными по очагам пожара, и оценка районов, пострадавших после пожара, затрудняются.

Целью данной работы является разработка обобщенной методологии моделирования лесных пожаров, прогнозирования направления их развития и последствий. Демонстрация работы предлагаемой

методики производится на примере типичного ландшафта Северо-Запада России.

Методология. Моделирование и принятие решений по лесным пожарам – это пространственная задача. Современные решения пространственных задач, как правило, включают в себя использование технологий ГИС-систем [13-15]. ГИС предоставляют инструменты, которые хранят и обрабатывают географические данные, т.е. данные о явлениях, связанных с их пространственными отношениями и расположением в пределах данной территории. ГИС поддерживают постоянно растущее число приложений, включая системы для управления природными ресурсами, охраны природы, геолого-разведки и других основных отраслей промышленности, картографирования переписей, обороны, аварийно-спасательных служб, городского планирования и управления окружающей средой [16-18]. По сути, ГИС-технологии являются важным инструментом для оценки природных и техногенных опасностей и рисков, и также хорошо подходят для управления и оценки динамики геоэкологических ситуаций в пожароопасных территориях в лесных районах.

Для моделирования лесных пожаров существует множество альтернативных моделей. Некоторые из них используют систему так называемых «топливных» моделей, которые стандартизированы на территории некоторых стран и основаны на оценке лесных материалов, которые могут служить «топливом» для пожара [19-21]. В настоящее время существует тринадцать общепринятых моделей топлива, которые варьируются от пастбищ до лесов. Одной из наиболее удачных моделей является *FARSITE (Fire Area Simu-*

lator) [22, 23], которая будет использована в данной статье.

Задачи исследования направлены на моделирование лесных пожаров и планирования действий в чрезвычайных ситуациях.

Как уже отмечалось ранее, принятие решений по лесным пожарам является очень сложной проблемой. Основная стратегия состоит в том, чтобы разделить проблему принятия решения на небольшие, понятные подзадачи; проанализировать каждую под проблему и логически интегрировать подзадачи для получения значимого общего решения. На рисунке 1 показан наш общий подход к моделированию лесных пожаров и планированию эвакуации в чрезвычайных ситуациях.

Принятие решений о лесных пожарах обязательно предполагает существенную пространственную основу. Программная среда ГИС служит пространственной базой данных (источником исходных данных для моделирования), для представления результатов моделирования, а также для анализа и синтеза результатов лицами, принимающими решения, для решения задачи, например, задачи эвакуации (рис. 1).

Данные дистанционного зондирования Земли, обрабатываемые в программном обеспечении *ERDAS*, являются одним из основных источников данных для ГИС, который представляет собой процесс сбора данных о поверхности Земли на расстоянии, обычно с помощью космического датчика [24-27]. Спутниковые системы *Landsat* [28] и *SPOT* [29] являются широко распространенными поставщиками данных дистанционного зондирования Земли для землеустройства, мониторинга окружающей среды, лесного хозяйства и т.д.

Избыточный объем информации, поступающей с орбитальных спутников, должен быть обработан

(сокращен или упрощен), прежде чем его можно будет включить в ГИС. Этот процесс включает в себя три основных этапа: предварительную обработку изображения, улучшение изображения и классификацию. Эти шаги могут быть реализованы с помощью программного обеспечения *ERDAS IMAGINE*. Это программное обеспечение помогает выявлять и анализировать земельный покров, растительность, точки возгорания влаги и пожаров, а также формировать пространственную базу данных по исследуемой территории.

FARSITE является моделью для пространственного и временного моделирования распространения и поведения пожаров в условиях неоднородного рельефа, топлива и погоды [30-32]. В подходе к моделированию используется реализация принципа распространения волн Гюйгенса для моделирования роста фронта пожара. На самом деле, этот процесс очень близок к широко используемым методам, используемым вручную для той же цели. Разница в том, что процесс автоматизирован, быстрее и детальнее, чем это возможно при ручных вычислениях. Кроме того, спроецированные периметры пожара и их поведение переносятся в числовом и графическом виде в другие приложения и в ГИС-приложения, такие как *ArcView*. Для этого *FARSITE* создает векторные периметры огня (полигоны или полилинии) через заданные промежутки времени в формате шейп-файла *ArcView*.

Программное обеспечение *FARSITE* изначально было разработано для поддержки принятия решений по управлению природными пожарами. Модель предназначалась как для этапов планирования, так и для этапов развития чрезвычайной ситуации. В этой статье мы сосредоточимся на этапе планирования.

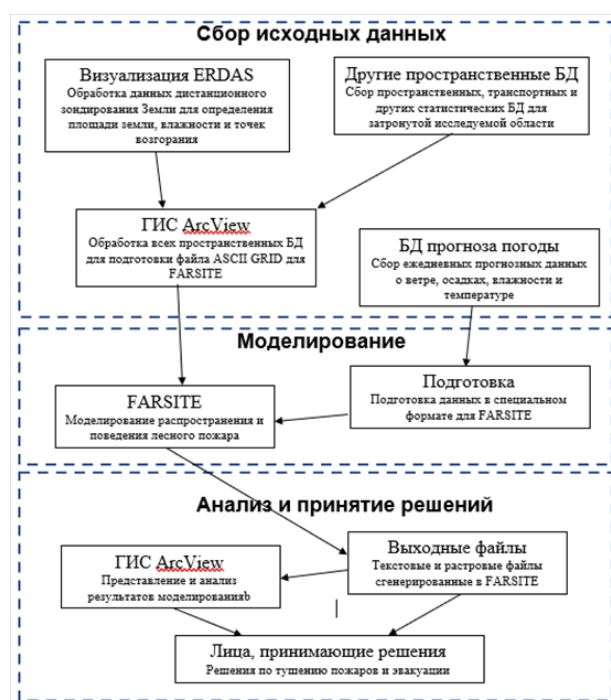


Рисунок 1 – Блок-схема предлагаемой методики

Результаты. Тестовая территория исследования расположена в восточной части Ленинградской области, примерно в 200 км от города Санкт-Петербурга в бассейне реки Оять. Эта территория имеет большую площадь лесных угодий. Длина реки Оять составляет около 245 километров, а площадь бассейна реки составляет около 350 квадратных километров. В этом примере мы построили базу данных ГИС с помощью *ArcView* (рис. 2). База данных включает в себя следующие темы: реки, дороги, населенные пункты, рельеф, представленный полилиниями, почвенно-растительный покров (растительность) и т.д.

На рисунке 2 в центре показана река Оять, параллельная самой верхней дороге, по которой возможна эвакуация. В легенде указано: города, дороги, водотоки, изолинии рельефа и тип «топлива»

для горения. Всего используется 13 типов. На левом берегу реки расположен крупнейший город региона – Аলেখовщина, с населением около 6 000 человек. Общая численность населения исследуемого района составляет около 10 000 человек. В летний период население увеличивается почти до 30 000 человек. Большая часть этого дополнительного населения живет в деревнях и небольших городах вдоль реки Оять. Дорожная сеть пересекает речную сеть, а также деревни.

Большинство дорог (грунтовых) не находятся в плохом состоянии и имеют только одну полосу движения. Реки, как и дороги, не очень широкие и не являются непреодолимой преградой для лесного пожара. Только река Оять является настоящей преградой для лесного пожара.

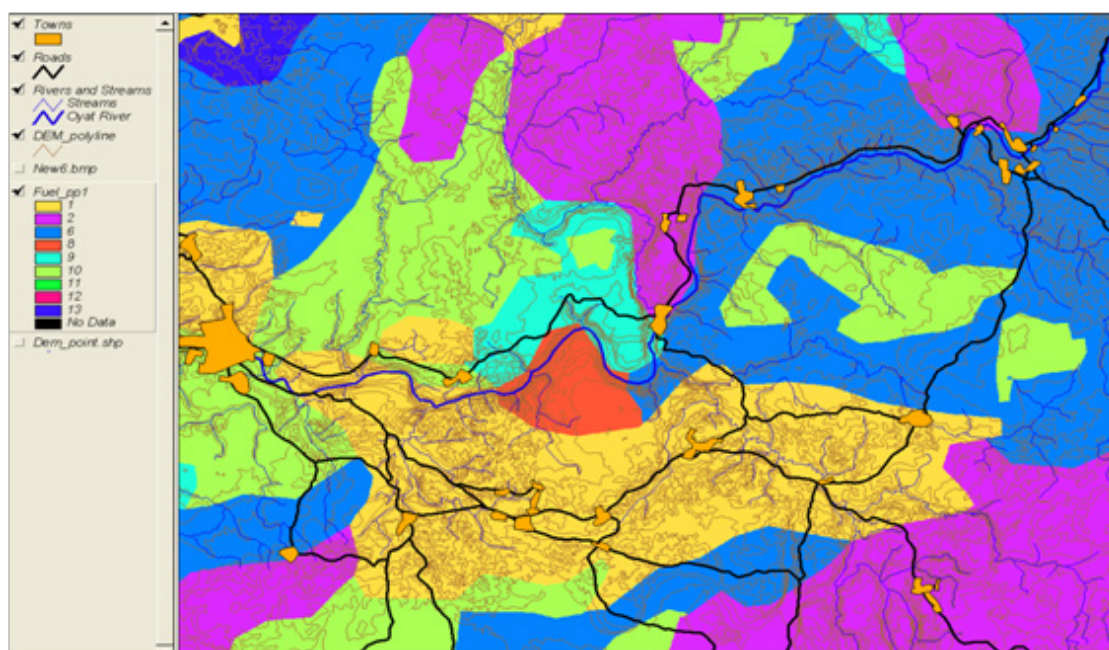


Рисунок 2 – Тематические модели площадей и пространственного распределения отработанного топлива

Обсуждение. Для создания структуры данных для *FARSITE (LCP)*, следующие пять «тем» сетки *ArcView* являются обязательными. Эти темы следующие:

1. Тема топливной модели. Тема растровой топливной модели должна присвоить топливной модели целочисленный индекс. Номера моделей 1-13 зарезервированы для стандартных моделей с топливом *NFFL* [33-36]:

- Трава и преобладание травы
- 1 Низкая трава (до 30 см);
- 2 Прочая трава и подлесок;
- 3 Высокая трава (до 1 м);
- Кустарник
- 4 Заросли кустарника (до 2 м);
- 5 Низкорослый кустарник (до 50 см);
- 6 Мелкая смешанная поросль – редкая;
- 7 Мелкая смешанная поросль – густая;
- Древесная подстилка
- 8 Засыпанная лесная подстилка;

9 Подстилка из лиственных пород;

10 Подстилка и подлесок;

11 Небольшие порубочные остатки и валежник;

12 Средние порубочные остатки и валежник;

13 Многочисленные порубочные остатки и валежник.

Модели топлива с номерами 0,98 или 99 используются для растров (ячеек), не относящихся к топливу. Вода представлена моделью под номером 98.

2. Тема для моделирования кроны деревьев. Растительный покров измеряется как доля земли, которая покрыта непосредственно под кронами деревьев. Смыкание кроны относится к экологическому состоянию относительной густоты кроны дерева. Можно сказать, что насаждения «закрываются» для набора деревьев с пологом, но по-прежнему имеют только 40% или 50% покрытия кроны.

3. Тема возвышения. Тема высот может иметь единицы измерения в метрах. Эта тема необходима

для адиабатической регулировки температуры и влажности, а также для преобразования распространения огня между горизонтальными и наклонными расстояниями.

4. Тема склона. Тема уклона должна быть целочисленной, хотя можно прочесть десятичные значения. Уклон может иметь единицы измерения в градусах или процентах наклона от горизонтали. Тема уклона необходима для вычисления эффектов распространения огня и солнечного излучения.

5. Тема экспозиции. Тема аспектов содержит значения для топографического аспекта, которые зависят от ГИС, предоставляющей данные. Значения экспозиции из *ArcView* должны быть значениями азимута (градусы по часовой стрелке от севера) и могут быть целыми или десятичными значениями.

Эти пять тем имеют одинаковый размер ячейки и пространственную протяженность. В нашем случае размер ячейки равен 30 м x 30 м, а пространственный экстенд равен (*ncols* = 3990, *nrows* = 2792). Сетка уклонов и сетка аспектов были созданы на основе сетки высот с помощью *ArcView Spatial Analyst*. Изолинии высот показаны на рисунке 2. Топливная сетка и сетка полога были созданы из растительной (покровной) темы. Все пять тем сетки были экспортированы в виде растровых файлов *ASCII* для использования в *FARSITE Landscape (.LCP)* (рис. 1).

Классификация топливной тематики для исследуемой территории была выведена из темы почвенно-растительного покрова в соответствии с топливными моделями *NFDRS* и *FBO* [33-36]. На исследуемой территории мы использовали модели 1, 2, 6 и 8-13. В рассматриваемом районе большинство лесных пожаров горят в топливных моделях 8 и 10, которые представляют собой хвойные леса с различной топливной нагрузкой. Другие топливные модели

описывают травянистые и кустарниковые угодья. Пространственное распределение используемых топливных моделей представлено на рисунке 2.

Моделирование *FARSITE* требует ряда шагов, которые начинаются с подготовки и ввода данных, включают выбор настроек и опций модели и заканчиваются управлением процессом моделирования. Первым шагом является идентификация региона с помощью ГИС и создание тем пространственных данных для проекта. Как упоминалось выше, они включают в себя пять основных тем: высота, наклон, экспозиция, топливная модель, покрытие навеса. В кейсе мы использовали одну дополнительную высоту основания короны темы. Растровые файлы загружаются в *FARSITE* с помощью файла *Landscape (.LCP)*. Этот ландшафтный файл был создан до запуска моделирования (рис. 3). Наряду с файлом *Landscape* существует множество других файлов, которые были созданы и загружены для создания проекта *FARSITE*.

Управление симуляцией начинается с установки допусков для расчета поведения при пожаре (в пространстве и во времени). Они называются параметрами модели и включают в себя временной шаг, видимый временной шаг, разрешение по расстоянию и периметру. Они управляют пространственными и временными деталями расчетов поведения при пожаре и влияют на ресурсы компьютера и время для завершения моделирования. Мы использовали пространственное разрешение 90 метров и временной шаг в 1 час. Кроме того, перед симуляцией мы устанавливаем даты и время начала и окончания. Наконец, мы устанавливаем точку (точки) зажигания. После запуска моделирования мы можем контролировать затраченное время и площадь выгорания, как показано на рисунке 3.

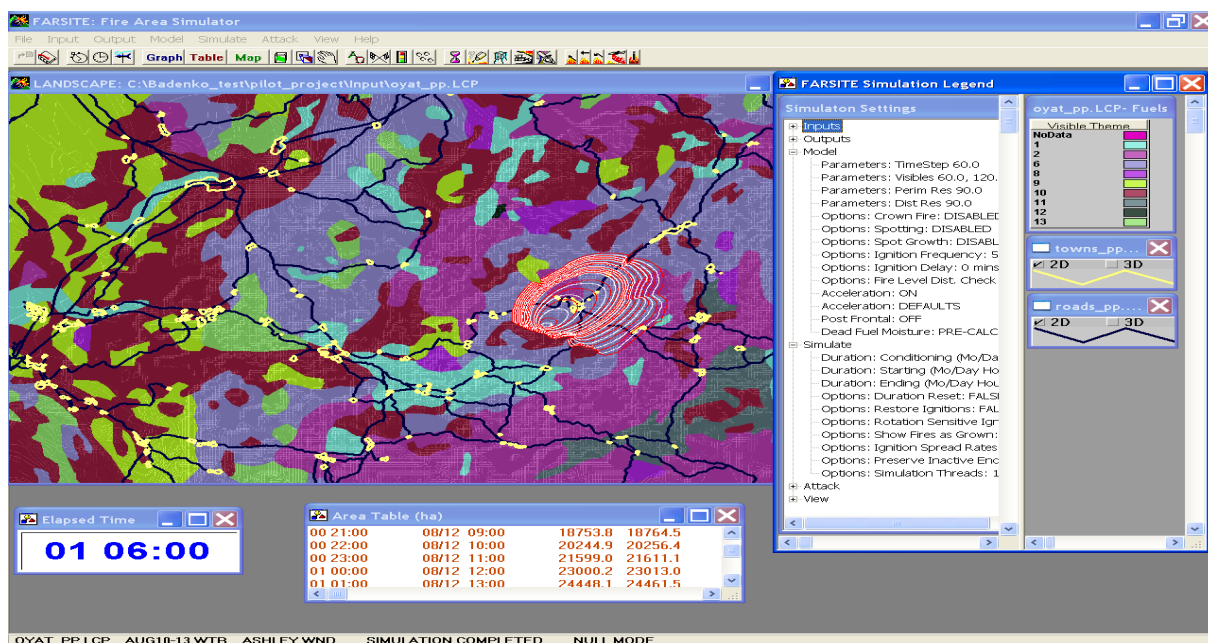


Рисунок 3 – Моделирование лесных пожаров в *FARSITE*

Для анализа выходных данных моделирования *FARSITE* мы задаем выходные данные в виде шейп-файлов *ArcView*. Кроме того, мы использовали переключатель "Сохранить периметры как полигоны" в диалоговом окне "Параметры экспорта и вывода" для создания шейп-файлов *ArcView*, содержащих полилинии, представляющие периметры пожаров со следующими атрибутами: месяц, день и время. Лица, принимающие решения, могут анализировать эту тему *ArcView* вместе с другими темами, как показано на рисунке 4. Используя эту последовательность изображений, лица, принимающие решения, могут определить, в какое время периметр пожара достиг жилых районов, а также какие дороги будут находиться в зоне лесных пожаров. Считается, что этот результат очень важен для решения о планировании эвакуации, которое мы обсудим в следующем разделе.

Использование ГИС-среды дает лицам, прини-

мающим решения, возможность детально анализировать цифровую эволюцию лесных пожаров. На рисунках 5, 6 изображены периметры пожара вместе с временными метками. Продолжительность имитируемого огневого процесса составляет в общей сложности двенадцать часов. Точка воспламенения отмечена «красным крестом» на рисунке 5, $T=13:00$. Согласно результатам моделирования, фронт пожара приближается к жилому кварталу и дороге в момент времени $T=15$, всего через 2 часа после возгорания. Пожар представляет серьезную угрозу для жителей нескольких деревень в центре этого района в периоды времени $T=16, 17, 18$. Результаты моделирования позволяют определить дороги, которые будут затронуты/уничтожены огнем. Эта информация играет важную роль в разработке политики эвакуации о том, когда, куда и как эвакуировать жителей деревни.

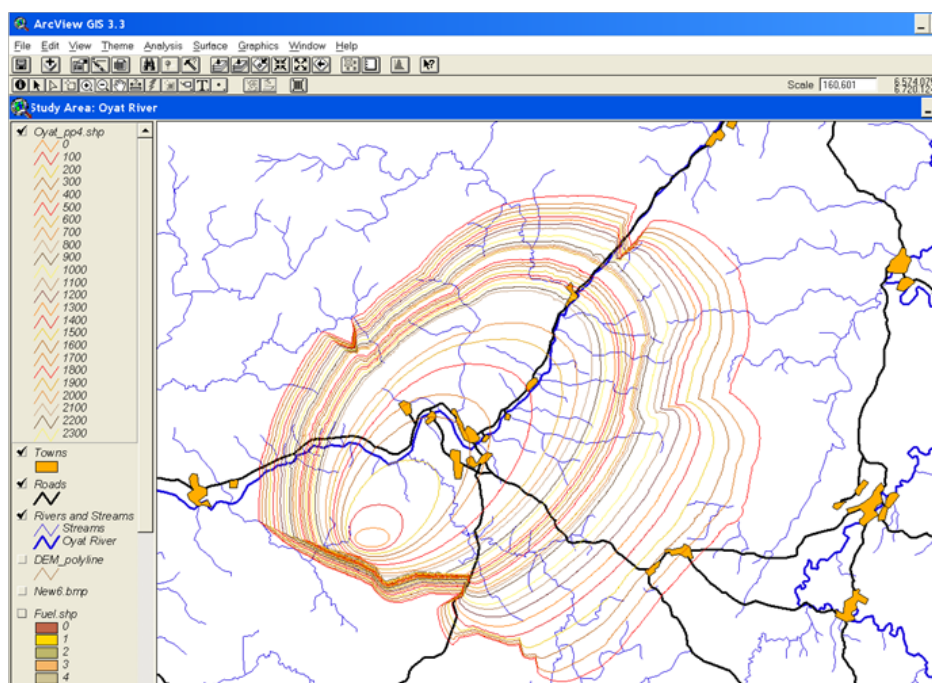


Рисунок 4 – Анализ результатов моделирования в *ArcView*

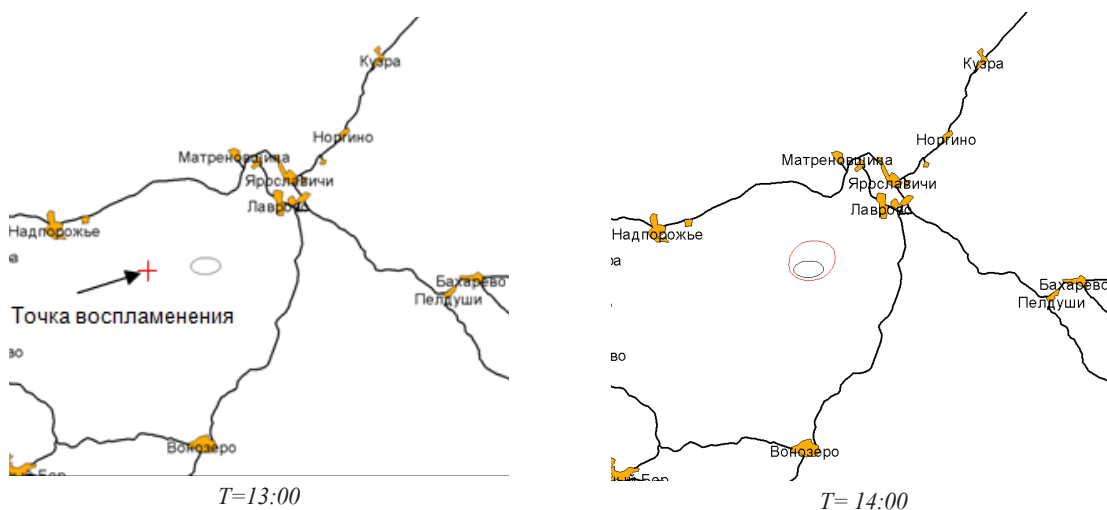


Рисунок 5 – Анализ эволюции лесных пожаров в среде ГИС

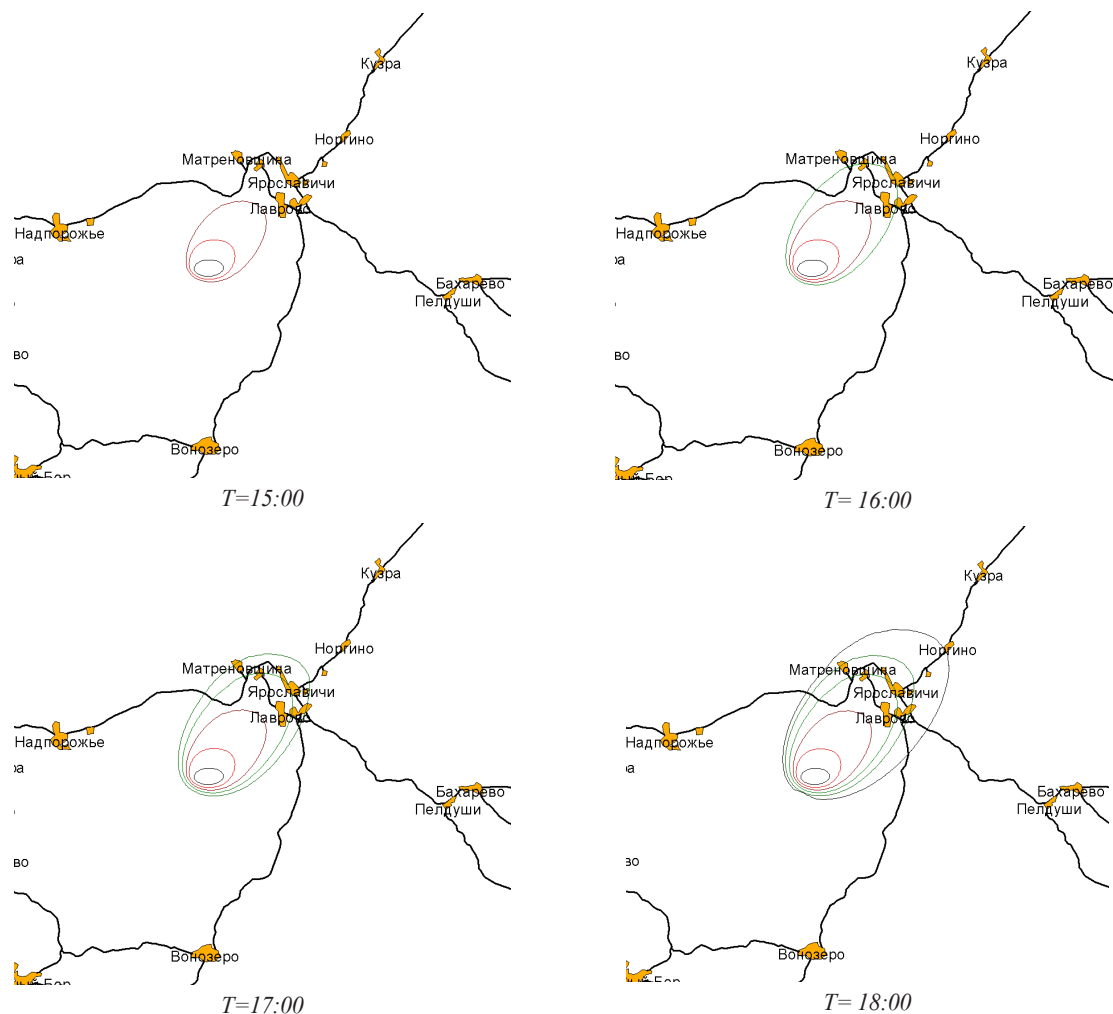


Рисунок 6 – Анализ эволюции лесных пожаров в среде ГИС

Выводы. Компьютерное моделирование лесных пожаров и планирование эвакуации являются одним из наиболее полезных инструментов для лиц, принимающих решения, которые отвечают за прогнозирование, смягчение последствий и оценку лесных пожаров. Одно из решений этой проблемы может быть получено путем применения методологии, описанной здесь в данной работе. Для решения этой проблемы была предложена систематизированная процедура сопряжения существующих ГИС и программ моделирования лесных пожаров. Эта процедура была опробована на территории Ленинградской области, Россия. Тематическое исследование иллюстрирует преимущества предложенного подхода, а результаты демонстрируют эффективность предлагаемого подхода.

Предлагаемый подход должен помочь лицам, принимающим решения, подойти к моделированию и процессу принятия решений о лесных пожарах. Наш процесс должен помочь определить местоположение и развитие пожаров, какие жилые районы необходимо эвакуировать и какие транспортные артерии являются критически важными. Поэтому наш подход должен быть полезен многим государственным органам всех уровней на основе подходов, описанных в данной

статье.

Ниже приведены некоторые возможные направления будущих исследований:

Разработка аналитических моделей, дополняющих имитационные модели как лесного пожара, так и алгоритмов эвакуации.

Разработка алгоритмов автоматического преобразования данных ДЗЗ в растровые темы для *FARSITE*.

Разработка методик использования базы данных прогнозов погоды в России в *FARSITE*.

Наконец, необходимо рассмотреть модели, учитывающие аспекты неопределенности лесных пожаров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г. Климатические изменения и лесные пожары в России // Лесоведение. – 2013. – №. 5. – С. 50-61.
2. Flannigan, M.D., Krawchuk, M.A., de Groot, W.J., Wotton, B.M., & Gowman, L.M. (2009). Implications of changing climate for global wildland fire. *International journal of wildland fire*, 18(5), 483-507. Doi:10.1071/WF08187
3. Gajendiran K., Kandasamy S., Narayanan M. Influences of wildfire on the forest ecosystem and climate change: A comprehensive study // *Environmental Research*. – 2023. – С. 117537. Doi: 10.1016/j.envres.2023.117537
4. Лупян Е.А. и др. Спутниковый мониторинг лесных пожаров в 21 веке на территории Российской Федерации

(цифры и факты по данным детектирования активного горения) //Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2017. – Т. 14. – №. 6. – С. 158.

5. Бондур В.Г. Актуальность и необходимость космического мониторинга природных пожаров в России // Вестник Отделения наук о Земле РАН. – 2010. – Т. 2. – С. NZ11001-NZ11001.

6. Sakellariou, S., Tampekis, S., Samara, F., Sfougaris, A., & Christopoulou, O. (2017). Review of state-of-the-art decision support systems (DSSs) for prevention and suppression of forest fires. *Journal of Forestry Research*, 28(6), 1107-1117. Doi: 10.1007/s11676-017-0452-1.

7. Баденко В.Л. Анализ экологических рисков в ГИС на основе нечетких множеств // Информация и космос. – 2013. – №3. – С. 78-84

8. Chicas S.D., Østergaard Nielsen J. Who are the actors and what are the factors that are used in models to map forest fire susceptibility? A systematic review //Natural Hazards. – 2022. – Т. 114. – №. 3. – С. 2417-2434. Doi:10.1007/s11069-022-05495-5

9. Барановский Н.В. Модель прогноза и мониторинга лесной пожарной опасности //Экология и промышленность России. – 2008. – №. 9. – С. 59-61.

10. Sharma K., Thapa G. Analysis and interpretation of forest fire data of Sikkim //Forest and Society. – 2021. – Т. 5. – №. 2. – С. 261-276.

11. Хасанов И.Р. Лесные пожары и устройство территорий вокруг населенных пунктов //Актуальные вопросы пожарной безопасности. – 2023. – №. 1 (15). – С. 15-20.

12. Яценко М.Е. Способы борьбы с лесными пожарами // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2023. № 1 (45). С. 51-59.

13. 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.

14. Кузнецов Л.Е. Картографический метод в мониторинге лесных ресурсов юга Тюменской области //Леса России и хозяйство в них. – 2023. – №. 1 (84). – С. 48-55.

15. Подрезов Ю.В. Основные направления предупреждения чрезвычайных лесопожарных ситуаций //Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2023. – №. 2. – С. 172-182.

16. Пономарёв Е.И. Оценка рисков возникновения лесных пожаров в результате гроз на основе ГИС-ориентированной технологии //География и природные ресурсы. – 2011. – №. 1. – С. 150-154.

17. Бокадаров С.А., Гудков М.А., Щербаченко Д.Г. Применение ГИС-технологий в целях оперативного обнаружения лесных пожаров и слежения за лесопожарной обстановкой //Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. – 2015. – Т. 2. – №. 1 (6). – С. 164-167.

18. Арефьев, Н.В., Баденко, В.Л., Крюлин, К.Н., Осипов, Г.К., & Черняк, М.Б. (1998). Мониторинг мелиорируемых земель на основе геоинформационных технологий. Мелиорация и водное хозяйство, (5), 41-43.

19. Gale, M.G., Cary, G.J., Van Dijk, A.I., & Yebra, M. (2021). Forest fire fuel through the lens of remote sensing: Review of approaches, challenges and future directions in the remote sensing of biotic determinants of fire behavior. *Remote Sensing of Environment*, 255, 112282. Doi: 10.1016/j.rse.2020.112282.

20. Hessl A.E. Pathways for climate change effects on fire: Models, data, and uncertainties //Progress in Physical Geography. – 2011. – Т. 35. – №. 3. – С. 393-407. Doi: 10.1177/0309133311407654

21. Гавриченко Я.Д., Аббасова В.Г. Проблемы обеспечения пожарной безопасности в лесах и тушения лесных пожаров //Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования. - 2019. - № 1(2). - с. 44-46.

22. Price S.J., Germino M.J. Modeling of fire spread in sagebrush steppe using FARSITE: an approach to improving input data and simulation accuracy //Fire Ecology. – 2022. – Т. 18. – №. 1. – С. 23. Doi:10.1186/s42408-022-00147-2

23. Rwanga S.S., Ndambuki J.M. Application of geographical information systems and FARSITE in fire spread modelling //International Journal of Environment and Sustainable Development. – 2014. – Т. 13. – №. 2. – С. 185-203. Doi: 10.1504/

IJESD.2014.060201

24. Pandey K., Ghosh S.K. Modeling of parameters for forest fire risk zone mapping //The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences. – 2018. – Т. 42. – С. 299-304. Doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-5-299-2018

25. Xi W., Zhou X., Zhang J. LANDISVIEW 2.0: An upgraded visualization and analytical tool for landscape modeling //Environmental Modelling & Software. – 2020. – Т. 134. – С. 104849. doi: 10.1016/j.envsoft.2020.104849

26. Fiorini S., Joret G., Wood D. R. Excluded forest minors and the Erdős-Pósa property //Combinatorics, Probability and Computing. – 2013. – Т. 22. – №. 5. – С. 700-721. Doi:10.1017/S0963548313000266

27. Варфоломеев А.Ф., Кислякова Н.А. Особенности дешифрирования пространственных объектов по космическим снимкам в программе Erdas Imagine 8.3 // Огарёв-Online. – 2015. – №. 4 (45). – С. 7.

28. Лачининский С.С., Логвинов И.А., Васильева В.А. Оценка спрота городских территорий Санкт-Петербурга на основе спутниковых изображений Landsat //Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. – 2023. – Т. 68. – №. 3.

29. Гречишев А.В. и др. Создание единых изображений обширных территорий по данным космических аппаратов SPOT 2 и SPOT 4 //Приложение к журналу Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. Сборник статей по итогам научно-технической конференции. – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования" Московский государственный университет геодезии и картографии", 2012. – №. 5. – С. 14-20.

30. Cochrane M.A. et al. Estimation of wildfire size and risk changes due to fuels treatments //International Journal of Wildland Fire. – 2012. – Т. 21. – №. 4. – С. 357-367. DOI:10.1071/WF11079

31. Jahdi, R., Del Giudice, L., Melis, M., Lovreglio, R., Salis, M., Arca, B., & Duce, P. (2023). Assessing the effects of alternative fuel treatments to reduce wildfire exposure. *Journal of Forestry Research*, 34(2), 373-386. Doi:10.1007/s11676-022-01504-2

32. McKinney, S.T., Abrahamson, I., Jain, T., & Anderson, N. (2022). A systematic review of empirical evidence for landscape-level fuel treatment effectiveness. *Fire Ecology*, 18(1), 21. Doi:10.1186/s42408-022-00146-3

33. Anderson H.E. Aids to determining fuel models for estimating fire behavior. – US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1981. – Т. 122.

34. Finney, M.A., 1998. FARSITE: Fire Area Simulator-model development and evaluation. USDA Forest Service, Research Paper RMRS-RP-4, Rocky Mountain Research Station, Ft. Collins, CO. 47 pages.

35. Станкевич Т.С. Прогнозирование пространственно-го поведения лесного пожара при неопределенности и нестационарности процесса //Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2021. – №. 1 (379). – С. 20-34.

36. Солодовниченко М.А., Замятин А.В. Алгоритм распространения лесного пожара с использованием модели Ротермела и клеточных автоматов //Информационные технологии. – 2013. – №. 8. – С. 58-63.

Статья поступила в редакцию 17.02.2024

Статья принята к публикации 15.03.2024