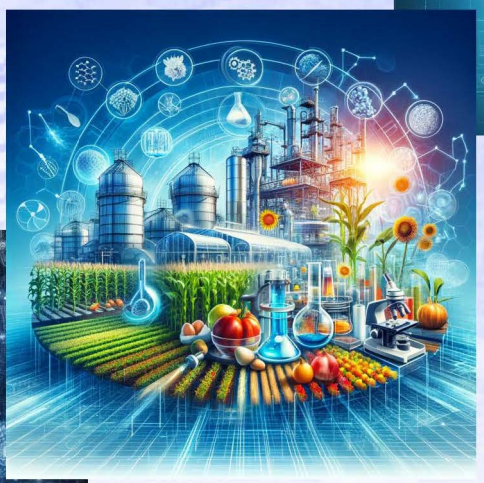
18+

vek21.penzgtu.ru

ISSN 2221-951X

# XXI век: ИТОГИ ПРОШЛОГО И ПРОБЛЕМЫ НАСТОЯЩЕГО плюс







2024

№4(68) т.13

технические науки

Основан в 2011 г.

18+

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

Том 13
№ 4 (68)
2024

Журнал выходит
4 раза в год

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

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

Учредитель – ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет»

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

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

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

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

Компьютерная верстка:
В.В. Зупарова

Технический редактор:
В.В. Зупарова

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

Подписано в печать 16.12.2024.
Выход в свет 25.12.2024.
Формат 60X84 1/8
Печать ризография.
Усл. печ. л. 26,2.
Тираж 100 экз. Заказ № 248.

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

*Цена свободная*

© ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет, 2024

## СВЕДЕНИЯ О ЧЛЕНАХ РЕДКОЛЛЕГИИ

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

***Заместители главного редактора:***
Авроров Валерий Александрович, доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры «Пищевые производства»
*(Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Россия)*
Ефремова Сания Юнусовна, доктор биологических наук, профессор,
профессор кафедры «Биотехнологии и техносферная безопасность»
*(Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Россия)*
Мотовилов Олег Константинович, доктор технических наук, доцент, начальник отдела пищевых систем и биотехнологий, главный научный сотрудник
*(Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук,*
*Новосибирская область, Новосибирский район, р.п. Краснообск, Россия)*
Пащенко Дмитрий Владимирович, доктор технических наук, профессор, ректор
*(Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Россия)*
Политаева Наталья Анатольевна, доктор технических наук, профессор,
профессор Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства
*(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт- Петербург, Россия)*
Чулков Валерий Александрович, доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры «Биомедицинская инженерия»
*(Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Россия)*

***Редакционная коллегия:***
Акинин Николай Иванович, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Техносферная безопасность»
*(Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, г. Москва, Россия)*
Антипов Сергей Тихонович, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Машины и аппараты пищевых производств»
*(Воронежский государственный университет инженерных технологий, г. Воронеж, Россия)*
Базарнова Юлия Генриховна, доктор технических наук, профессор,
директор Высшей школы биотехнологии и пищевых технологий
*(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт- Петербург, Россия)*
Бакин Игорь Алексеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Процессов и аппаратов перерабатывающих производств» (*Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А.Тимирязева г. Москва, Россия)*
Баширов Мусса Гумерович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий *(Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Салавате), Институт нефтепереработки и нефтехимии, г. Салават, Россия)*
Богданов Андрей Владимирович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности» *(Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), г. Челябинск, Россия)*
Бурахта Вера Алексеевна, доктор химических наук, профессор
*(Западно-Казахстанский аграрно-технический университет имени Жангир хана, г.Уральск, Республика Казахстан)*
Васильев Андрей Витальевич, доктор технических наук, профессор, начальник отдела инженерной экологии и экологического мониторинга Самарского научного центра РАН, заведующий кафедрой «Химическая технология и промышленная экология» *(Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия)*
Голуб Ольга Валентиновна, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела пищевых систем и биотехнологий *(Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук, Новосибирская область, Новосибирский район, р.п. Краснообск, Россия)*
Громов Юрий Юрьевич, доктор технических наук, профессор, директор института автоматики и информационных технологий *(Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Россия)*
Давыденко Наталия Ивановна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технология и организация общественного питания», начальник отдела подготовки научных кадров
*(Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Россия)*
Дмитриев Михаил Сергеевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры автомобильного транспорта, информационных технологий и методики обучения техническим дисциплинам
*(Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет)*
Зинкин Сергей Александрович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Вычислительная техника»
*(Пензенский государственный университет, г. Пенза, Россия)*

Зыбина Ольга Александровна, доктор технических наук, доцент, заместитель начальника по научной работе *(Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, г. Санкт-Петербург, Россия)*
Иващенко Антон Владимирович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Вычислительная техника» *(Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия)*
Квятковская Ирина Юрьевна, доктор технических наук, профессор, проректор по учебной работе, заведующий кафедрой «Высшая и прикладная математика»
*(Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань, Россия)*
Косников Юрий Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Информационно-вычислительные системы» *(Пензенский государственный университет, г. Пенза, Россия)*
Кручинина Наталия Евгеньевна, доктор технических наук, профессор, декан факультета биотехнологии и промышленной экологии, заведующий кафедрой «Промышленная экология» *(Российский государственный химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, г. Москва, Россия)*
Куликовских Илона Марковна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры информационных систем и технологий *(Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, г. Самара, Россия)*
Мамедова Тарана Аслан кызы, доктор технических наук, профессор, заместитель директора
*(Институт Нефтехимических процессов НАН Азербайджана, г. Баку, Азербайджан)*
Маскевич Сергей Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, директор *(Международный государственный экологический институт им.А.Д. Сахарова Белорусского государственного университета, г.Минск, Республика Беларусь)*
Махмудова Любовь Ширваниевна, доктор технических наук, профессор, директор
*(Институт нефти и газа, Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова, г.Грозный, Чеченская Республика)*
Милентьева Ирина Сергеевна, доктор технических наук, доцент, доцент кафедры бионанотехнологии *(Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Россия)*
Михеев Михаил Юрьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные технологии и системы» *(Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Россия)*
Петрова Ирина Юрьевна, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры систем автоматизированного проектирования и моделирования
*(Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, г. Астрахань, Россия)*
Прохоров Сергей Антонович, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Информационные системы и технологии»
*(Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королева, г. Самара, Россия)*
Рожнов Евгений Дмитриевич, доктор технических наук, профессор кафедры пищевой инженерии *(Уральский государственный экономический университет, г. Екатеринбург, Россия)*
Рыбаков Анатолий Валерьевич, доктор технических наук, профессор, начальник научно-исследовательского центра Академия гражданской защиты *(Академия гражданской защиты МЧС России, г. Москва, Россия)*
Стороженко Павел Аркадьевич, член-корреспондент Российской академии наук, доктор химических наук, профессор, управляющий директор ГНЦ РФ «Государственный ордена Трудового Красного Знамени НИИ химии и технологии элементоорганических соединений», профессор кафедры химии и технологии элементоорганических соединений
*(Московский институт тонкой химической технологии имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия)*
Танклевский Леонид Тимофеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Пожарная безопасность» *(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Высшая школа техносферной безопасности, г. Санкт-Петербург, Россия)*
Таранцева Клара Рустемовна, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Биотехнологии и техносферная безопасность» *(Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Россия)*
Тихомирова Елена Ивановна, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой «Экология и техносферная безопасность» *(Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина, г. Саратов, Россия)*
Шалагин Сергей Викторович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Компьютерные системы» *(Казанский Национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева, г. Казань, Россия)*
Ципенко Антон Владимирович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры 801
*(Московский авиационный институт, г. Москва, Россия)*
Школьникова Марина Николаевна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии питания
*(Уральский государственный экономический университет, г. Екатеринбург, Россия)*

## ОБЪЯВЛЕНИЕ

**1. CORRIGENDUM TO: [XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2021. – Т. 10. – № 4(56). – С. 73-76. – DOI 10.46548/21vek-2021-1056-0014. – EDN HMWUIP.]**

Исправления в «Оценка точности измерения теплопроводности бинарных и смешанных растворов электролитов / Г.А. Зеленков, И.М. Данцевич, А.Н. Мышкина // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2021. – Т. 10. – № 4(56). – С. 73-76. – DOI 10.46548/21vek-2021-1056-0014. – EDN HMWUIP».

Настоящим информируем читателей о том, что в финальную версию статьи были внесены изменения на русском и английском языках.

По просьбе авторов заменены сведения об авторах, правильными считать следующие:

*на русском языке:*

**Зеленков Геннадий Анатольевич,** доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры высшей математики и физики

**Данцевич Игорь Михайлович,** кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации судового электрооборудования и средств электроавтоматики

*на английском языке:*

**Zelenkov Gennady Anatolyevich,** doctor of physical and mathematical sciences, associate professor, professor of the Department of Higher Mathematics and Physics

**Dantsevich Igor Mikhailovich,** candidate of technical sciences, associate professor of the Department of Operation of Shipboard Electrical Equipment and Electroautomatics Facilities

Исправление не повлияло на конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Исправление было внесено в онлайн-версию журнала.

**2. CORRIGENDUM TO: [XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022. – Т. 11. – № 1(57). – С. 19-22. – DOI 10.46548/21vek-2022-1157-0003. – EDN TKHDJO]**

Исправления в «Математическая модель нейтрализации $CO_2$ и продуктов сгорания ДВС / Г.А. Зеленков, И.М. Данцевич, А.Н. Мышкина // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022. – Т. 11. – № 1(57). – С. 19-22. – DOI 10.46548/21vek-2022-1157-0003. – EDN TKHDJO».

Настоящим информируем читателей о том, что в финальную версию статьи были внесены изменения на русском и английском языках.

По просьбе авторов заменены сведения об авторах, правильными считать следующие:

*на русском языке:*

**Зеленков Геннадий Анатольевич,** доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры высшей математики и физики

**Данцевич Игорь Михайлович,** кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации судового электрооборудования и средств электроавтоматики

*на английском языке:*

**Zelenkov Gennady Anatolyevich,** doctor of physical and mathematical sciences, associate professor, professor of the Department of Higher Mathematics and Physics

**Dantsevich Igor Mikhailovich,** candidate of technical sciences, associate professor of the Department of Operation of Shipboard Electrical Equipment and Electroautomatics Facilities

Исправление не повлияло на конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Исправление было внесено в онлайн-версию журнала.

## СОДЕРЖАНИЕ

### *ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ*

**ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПЛОСКИХ КРИВЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СМЕШИВАЮЩИХ ФУНКЦИЙ, ДЕЙСТВУЮЩИХ ВДОЛЬ ОСИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ КООРДИНАТ: АЛЬТЕРНАТИВА СПЛАЙНАМ**
Косников Юрий Николаевич, Абубекеров Динар Рашидович.....12

**СОЦИО-КИБЕРФИЗИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ**
Бодин Олег Николаевич, Безбородова Оксана Евгеньевна,
Жигачев Василий Маратович, Мишина Кристина Дмитриевна.....20

**КВАНТОВО-КЛАССИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТОСТРИКЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ НА МИКРОУРОВНЕ**
Карпухин Эдуард Владимирович.....30

**СЕГМЕНТАЦИЯ ЦВЕТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЯБЛОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ НЕЧЕТКОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ**
Громов Юрий Юрьевич, Карасев Павел Игоревич,
Шамсулдин Хайдар Абдулваххаб Х., Мустафа Абдулкадим Аль-Амиди Дхаир.....35

**ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ КАПИТАЛА: СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ**
Пащенко Татьяна Юрьевна, Минюшина Елена Сергеевна, Колганова Яна Алексеевна.....41

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОДДЕРЖКИ ИНЖЕНЕРНОГО МЫШЛЕНИЯ В ЕДИНОМ ИНФОРМАЦИОННОМ ПРОСТРАНСТВЕ ПРЕДПРИЯТИЯ**
Иващенко Антон Владимирович, Терехин Михаил Александрович.....46

**ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ИМПУЛЬСНАЯ КОДОВАЯ МОДУЛЯЦИЯ В ЗАДАЧАХ СЖАТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИХ БАЗИСОВ**
Бастрычкин Александр Сергеевич, Гусев Сергей Игоревич,
Костров Борис Васильевич, Бабаев Сергей Игоревич.....55

**НЕЙРОСЕТЕВАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРОМЕЖУТОЧНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В СИСТЕМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОДОГРЕВАТЕЛЕМ ГАЗА**
Молчанов Дмитрий Вадимович.....62

**АДАПТИВНЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ОБУЧЕНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ: НАПРАВЛЕННАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ДАННЫХ ДЛЯ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА**
Розанов Иван Александрович, Сотников Алексей Александрович, Ким Тамара Александровна.....69

**АНАЛИЗ И ВЫБОР МЕТОДА ИМПУТАЦИИ ПРОПУЩЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ДЛЯ НЕБОЛЬШОГО НАБОРА МЕДИЦИНСКИХ ДАННЫХ**
Попова Ольга Александровна.....76

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ *LMS* С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОВЕРКИ ПРОГРАММНЫХ ЗАДАНИЙ**
Маркин Евгений Игоревич, Зупарова Валентина Владимировна, Панфилова Марина Ивановна.....90

**ПРОБЛЕМЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОБРОВОЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ НА ОСНОВЕ КРАУДСОРСИНГА КОНЕЧНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ**
Андропов Андрей Васильевич, Дергачев Андрей Михайлович,
Белозубов Александр Владимирович, Гурьянова Аглая Геннадьевна.....95

**ДВУМЕРНЫЙ НЕЧЕТКИЙ МЕТОД КЛАСТЕРИЗАЦИИ *C*-СРЕДНИХ ДЛЯ СЕГМЕНТАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ**
Громов Юрий Юрьевич, Карасев Павел Игоревич,
Шамсулдин Хайдар Абдулваххаб Х., Мустафа Абдулкадим Аль-Амиди Дхаир.....111

**ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ В СИСТЕМЕ ФИНАНСОВОГО КОНТРОЛЯ**
Пащенко Татьяна Юрьевна, Ильичева Ирина Юрьевна, Сальникова Полина Алексеевна.....118

## *ПИЩЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ*

**ПРИГОТОВЛЕНИЕ РАСТВОРОВ, ЭМУЛЬСИЙ И СУСПЕНЗИЙ В СМЕШИВАЮЩЕМ АППАРАТЕ С ПУЛЬСАЦИОННОЙ КАМЕРОЙ И МНОГОСОПЛОВЫМ УСТРОЙСТВОМ**
Авроров Валерий Александрович,
Сарафанкина Елена Александровна, Мурашкина Оксана Александровна.....124

**ЗАКВАСОЧНЫЕ КУЛЬТУРЫ МОЛОЧНОКИСЛЫХ БАКТЕРИЙ С ПОВЫШЕННЫМИ АНТАГОНИСТИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ ДЛЯ ХЛЕБОПЕКАРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**
Китаевская Светлана Владимировна, Решетник Ольга Алексеевна,
Камартдинова Дарья Рафаэловна.....130

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛЕЦИТИНА ПОДСОЛНЕЧНОГО НА КАЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ХЛЕБНОГО ПРОДУКТА**
Порошина Дарья Денисовна, Брашко Иван Сергеевич,
Лазарев Владимир Александрович, Партина Александра Антоновна.....136

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ *MALDI-MS* ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АЗАИНДОЛИЗИНОВ С ОБЪЕКТАМИ БЕЛКОВОЙ ПРИРОДЫ**
Миргородская Ольга Александровна, Козьмин Юрий Петрович,
Бубляев Ростислав Анатольевич, Малютенкова Светлана Михайловна.....142

**ПОДТВЕРЖДЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ МЕЛАНИНА, ВЫДЕЛЕННОГО ИЗ ЛУЗГИ *FAGOPYRUM ESCULENTUM***
Уразова Яна Валерьевна, Кадрицкая Елена Александровна.....153

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ДЕЛИКАТЕСНЫХ МЯСНЫХ ПРОДУКТОВ**
Моргунова Наталья Львовна, Фоменко Ольга Сергеевна,
Кизиева Анна Сергеевна, Семилет Никита Александрович.....159

**АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ НАПРАВЛЕНИЙ В ТЕХНОЛОГИИ МАРИНОВАНИЯ МЯСНЫХ ПРОДУКТОВ**
Чугунова Ольга Викторовна, Степнева Екатерина Витальевна,
Панкратьева Наталья Анатольевна, Мысаков Денис Сергеевич.....166

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КИСЛОТНОЙ ЭКСТРАКЦИИ БЕЛКОВ ИЗ ЖМЫХА РАПСА**
Дегтярев Иван Александрович, Фоменко Иван Андреевич, Алексаночкин Денис Игоревич.....174

**ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ**
Давыденко Наталия Ивановна, Зирка Анна Юрьевна,
Куракин Михаил Сергеевич, Костина Наталья Геннадьевна.....182

**РАЗРАБОТКА РЕЦЕПТУР НАПИТКОВ ДЛЯ ДИЕТИЧЕСКОГО ЛЕЧЕБНОГО И ДИЕТИЧЕСКОГО ПРОФИЛАКТИЧЕСКОГО ПИТАНИЯ**
Гаврилов Андрей Станиславович, Болотова Анна Викторовна,
Минниханова Екатерина Юрьевна, Лесникова Наталия Александровна.....191

## *ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ*

**ОБОСНОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ УРОВНЯ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА МЕХАНИЗАТОРОВ ПУТЕМ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕКОТОРЫХ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ОРГАНИЗМА**
Егорова Ирина Викторовна, Гайда Анна Станиславовна, Лысенко Сергей Григорьевич.....199

**ОЦЕНКА КОМФОРТНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В РАЙОНЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ**
Афанасьева Татьяна Анатольевна, Копытенкова Ольга Ивановна.....205

**АНАЛИЗ НОРМАТИВНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПО ОРГАНИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЮ ПРИРОДООХРАННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ ПРИ ПРЕДОТВРАЩЕНИИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ОТ РАЗЛИВОВ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ**
Головацкая Леся Ивановна.....210

**СПОСОБ ЛИКВИДАЦИИ АВАРИЙНЫХ РАЗЛИВОВ НЕФТИ НА ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ ОТХОДАМИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА**
Хисамова Амина Шамилевна, Степанова Светлана Владимировна, Алексеева Анна Александровна.....217

**ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК КАК ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА**
Нам Галина Евгеньевна.....224

**ОЦЕНКА СФОРМИРОВАННОСТИ МОДЕЛИ БЕЗОПАСНОГО ПОВЕДЕНИЯ РАБОТНИКА ЧЕРЕЗ ОБОБЩЕННУЮ ФУНКЦИЮ ЖЕЛАТЕЛЬНОСТИ ХАРРИНГТОНА**
Субботина Надежда Андреевна, Никулин Андрей Николаевич, Гончарук Татьяна Николаевна.....230

**ТЕРМИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ РОБОТИЗИРОВАННЫХ УСТАНОВОК ПОЖАРОТУШЕНИЯ**
Киселева Виктория Сергеевна.....238

**ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА ПРИ ОБРАЩЕНИИ С ОТХОДАМИ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ**
Козырь Дмитрий Александрович.....244

**МЕТОД ОРГАНИЗАЦИИ СИСТЕМЫ СПАСЕНИЯ И ЭВАКУАЦИИ, ИНТЕГРИРОВАННОЙ СО СТРАХОВОЧНОЙ СИСТЕМОЙ ПРИ РАБОТЕ НА ОПОРЕ С ЛЕСТНИЦЫ**
Сенченко Владимир Александрович, Каверзнева Татьяна Тимофеевна, Рыбаков Анатолий Валерьевич, Скрипник Игорь Леонидович.....252

**ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА (*CHAT GPT*) ДЛЯ КАЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ РИСКА**
Бызов Антон Прокопьевич, Колесников Евгений Юрьевич, Чернышов Михаил Викторович, Чичирина Дарья Дмитриевна.....260

**НОВЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ И НОРМИРОВАНИЮ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА НА ЧЕЛОВЕЧЕСКОЕ ТЕЛО ПРИ ПОЖАРЕ**
Сергеева Маргарита Дмитриевна, Колесников Евгений Юрьевич.....270

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРАВНЕНИЙ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ПО ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОМ СОСТАВЕ**
Закирова Альфия Резавановна.....275

**АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНЦЕНТРАТОРОВ ВЛАГИ В ВОПРОСАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАЩИТЫ ЛОПАСТЕЙ ВЕТРОТУРБИН**
Петров Антон Вячеславович, Ковальногов Владислав Николаевич, Чукалин Андрей Валентинович, Бузаева Мария Владимировна.....281

**ПРОБЛЕМЫ ОБОГАЩЕНИЯ КИСЛОРОДОМ ВОЗДУХА ПОМЕЩЕНИЯ И УДАЛЕНИЯ ИЗ НЕГО УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА**
Радионов Николай Владимирович, Слугинова Наталья Ивановна, Клейменова Тамара Валерьевна.....293

**ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ НАНОМОДИФИЦИРОВАНИЯ ПРИ СОЗДАНИИ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА**
Иванов Алексей Владимирович.....300

**АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОРФЯНОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ВОДОРОДА**
Чусов Александр Николаевич, Политаева Наталья Анатольевна, Романов Михаил Васильевич, Щур Александр Васильевич.....309

**ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПОДБОРЕ ОЧИСТИТЕЛЕЙ БАЛЛАСТНЫХ ВОД К ЗАДАННЫМ ЗАГРЯЗНИТЕЛЯМ**
Цыгута Анна Николаевна, Головацкая Леся Ивановна, Джалмухамбетова Елена Азатуллаевна.....315

## CONTENT

### *INFORMATION SCIENCE, COMPUTING DEVICES AND CONTROLING*

**ISUALIZATION OF FLAT CURVES USING BLENDING FUNCTIONS OPERATING ALONG THE A PARAMETRIC COORDINATE SYSTEM AXIS: AN ALTERNATIVE TO SPLINES**
Kosnikov Yuri Nikolaevich, Abubekerov Dinar Rashidovich.....12

**SOCIO-CYBERPHYSICAL SYSTEMS FOR MONITORING AND CONTROL OF OBJECTS**
Bodin Oleg Nikolaevich, Bezborodova Oksana Evgenievna,
Zhigachev Vasily Maratovich, Mishina Kristina Dmitrievna.....20

**QUANTUM-CLASSICAL ALGORITHM FOR STUDYING MAGNETOSTRICTIVE PHENOMENA AT THE MICROLEVEL**
Karpukhin Eduard Vladimirovich.....30

**SEGMENTATION OF COLORED APPLE IMAGES USING FUZZY CLUSTERING METHODS**
Gromov Yuri Yurievich, Karasev Pavel Igorevich,
Shamsuldaeen Haidar Abdulwahhab H., Mustafa Abdulkadhim Al-Ameedee Dhahir.....35

**THE FEATURES OF CAPITAL MOVEMENT: CURRENT TRENDS**
Pashchenko Tatiana Yuryevna, Minyushina Elena Sergeevna, Kolganova Yana Alekseevna.....41

**ENGINEERING CREATIVITY SUPPORT INFORMATION TECHNOLOGIES IN ENTERPRISE SOLID INFORMATION SPACE**
Ivaschenko Anton Vladimirovich, Terekhin Mikhail Aleksandrovich.....46

**DIFFERENTIAL PULSE CODE MODULATION IN IMAGE COMPRESSION PROBLEMS USING NON-TRIGONOMETRIC BASES**
Bastrychkin Aleksandr Sergeevich, Gusev Sergey Igorevich,
Kostrov Boris Vasilevich, Babaev Sergey Igorevich.....55

**NEURAL NETWORK SYSTEM FOR CONTROLLING THE INTERMEDIATE HEAT CARRIER CONCENTRATION OF THE AUTOMATIC GAS HEATER CONTROL SYSTEM**
Molchanov Dmitry Vadimovich.....62

**ADAPTIVE METHODS OF NEURAL NETWORK TRAINING MANAGEMENT: GUIDED DATA GENERATION FOR CLUSTER ANALYSIS**
Rozanov Ivan Aleksandrovich, Sotnikov Aleksei Aleksandrovich, Kim Tamara Aleksandrovna.....69

**ANALYZE AND SELECT A METHOD FOR MISSING VALUE IMPUTATION FOR A SMALL MEDICAL DATASET**
Popova Olga Aleksandrovna.....76

**DEVELOPMENT OF AN *LMS* SYSTEM UTILIZING LARGE LANGUAGE MODELS FOR AUTOMATING THE ASSESSMENT OF PROGRAMMING ASSIGNMENTS**
Markin Evgeny Igorevich, Zuparova Valentina Vladimirovna, Panfilova Marina Ivanovna.....90

**EFFICIENCY PROBLEMS OF VOLUNTARY COMPUTING BASED ON CROWDSOURCING OF USER END-DEVICES**
Andropov Andrey Vasilyevich, Dergachev Andrey Mikhailovich,
Belozubov Alexander Vladimirovich, Guryanova Aglaya Gennadievna.....95

**A NEW TWO-DIMENSIONAL FUZZY *C*-MEANS CLUSTERING METHOD FOR IMAGE SEGMENTATION**
Gromov Yuri Yurievich, Karasev Pavel Igorevich,
Shamsuldaeen Haidar Abdulwahhab H., Mustafa Abdulkadhim Al-Ameedee Dhahir.....111

**PROBLEMS AND SOLUTIONS IN THE FINANTIAL CONTROL SYSTEM**
Pashchenko Tatiana Yuryevna, Ilyicheva Irina Yuryevna, Salnikova Polina Alekseevna.....118

## *FOOD TECHNOLOGY*

**PREPARATION OF SOLUTIONS, EMULSIONS AND SUSPENSIONS IN A MIXING APPARATUS WITH A PULSATION CHAMBER AND A MULTI-NOZZLE DEVICE**
Avrorov Valery Alexsandrovich, Sarafankina Elena Alexsandrovna, Murashkina Oxana Alexsandrovna.....124

**LACTIC ACID BACTERIA STARTER CULTURES WITH INCREASED ANTAGONISTIC PROPERTIES FOR THE BAKERY INDUSTRY**
Kitaevskaya Svetlana Vladimirovna, Reshetnik Olga Alexeevna, Kamartdinova Darya Rafaelovna.....130

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF SUNFLOWER LECITHIN ON THE QUALITATIVE CHARACTER-ISTICS OF A BREAD PRODUCT**
Poroshina Darya Denisovna, Brasko Ivan Sergeevich,
Lazarev Vladimir Alexandrovich, Partina Alexandra Antonovna.....136

**USE OF *MALDI-MS* AND ELECTRON MICROSCOPY TO STUDY THE INTERACTION OF AZAINDOLYSINES WITH OBJECTS OF PROTEIN NATURE**
Mirgorodskaya Olga Alexandrovna, Kozmin Yuri Petrovich,
Bublyaev Rostislav Anatolyevich, Malyutenkova Svetlana Michailovna.....142

**CONFIRMATION OF THE SAFETY OF MELANIN ISOLATED FROM *FAGOPYRUM ESCULENTUM* HUSKS**
Urazova Yana Valerievna, Kadritskaya Elena Aleksandrovna.....153

**IMPROVEMENT OF TECHNOLOGY FOR THE PRODUCTION OF DELICACY MEAT PRODUCTS**
Morgunova Natalia Lvovna, Fomenko Olga Sergeevna,
Kizieva Anna Sergeevna, Semilet Nikita Alexandrovich.....159

**ANALYSIS OF MODERN TRENDS IN TECHNOLOGY OF MARINATION OF MEAT PRODUCTS**
Chugunova Olga Viktorovna, Stepneva Ekaterina Vitalievna,
Pankratieva Natalia Anatolyevna, Mysakov Denis Sergeevich.....166

**INVESTIGATION OF THE PROCESS OF ACID EXTRACTION OF PROTEINS FROM RAPESEED CAKE**
Degtyarev Ivan Alexandrovich, Fomenko Ivan Andreevich, Aleksanochkin Denis Igorevich.....174

**APPLICATION OF MACHINE LEARNING ALGORITHMS FOR PREDICTING THE CHEMICAL COMPOSI-TION OF FOOD PRODUCTS**
Davydenko Nataliia Ivanovna, Kurakin Mikhail Sergeevich,
Zirka Anna Yuryevna, Kostina Natalia Gennadievna.....182

**DEVELOPMENT OF BEVERAGE FORMULATIONS FOR DIETARY THERAPEUTIC AND DIETARY PREVENTIVE NUTRITION**
Gavrilov Andrey Stanislavovich, Bolotova Anna Viktorovna,
Minnikhanova Ekaterina Yurievna, Lesnikova Natalia Alexandrovna.....191

## *TECHNOSPHERE SAFETY*

**RATIONALE FOR INCREASING THE LEVEL OF LABOR SAFETY MECHANIZERS BY STUDYING SOME PHYSIOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE ORGANISM**
Egorova Irina Viktorovna, Gayda Anna Stanislavovna, Lysenko Sergey Grigorievich.....199

**ASSESSMENT OF THE COMFORT AND SAFETY OF THE ENVIRONMENT IN THE AREA OF THE LOCATION OF LINEAR OBJECTS OF RAILWAY TRANSPORT SYSTEMS**
Afanaseva Tatyana Anatolyevna, Kopytenkova Olga Ivanovna.....205

**ANALYSIS OF REGULATORY SUPPORT FOR THE ORGANIZATION AND MANAGEMENT OF ENVIRONMENTAL PROTECTION ACTIVITIES IN THE PREVENTION OF ENVIRONMENTAL POLLUTION FROM OIL AND PETROLEUM PRODUCT SPILLS**
Golovatskaya Lesya Ivanovna.....210

**RESEARCH ON THE ELIMINATION OF OIL SPILLS ON THE SURFACE OF WATER USING WHEAT HULLS**
Khisamova Amina Shamilevna, Stepanova Svetlana Vladimirovna, Alekseeva Anna Aleksandrovna.....217

**DIGITAL TWIN AS A TOOL FOR IMPLEMENTING A DIGITAL OCCUPATIONAL SAFETY CONTROL SYSTEM**
Nam Galina Evgenievna.....224

**ASSESSMENT OF THE FORMATION OF A MODEL OF SAFE BEHAVIOR OF WORKERS THROUGH THE GENERALIZED HARRINGTON DESIRABILITY FUNCTION**
Subbotina Nadezhda Andreevna, Nikulin Andrey Nikolaevich, Goncharuk Tatiana Nikolaevna.....230

**THERMAL STABILITY AND PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF STRUCTURAL COMPOSITE MATERIALS FOR THERMAL PROTECTION OF ROBOTIC FIRE EXTINGUISHING SYSTEMS**
Kiseleva Victoria Sergeevna.....238

**ENVIRONMENTAL RISK ASSESSMENT IN HANDLING SUBSOIL MINING WASTE**
Kozyr Dmitry Aleksandrovich.....244

**A METHOD OF ORGANIZING A RESCUE AND EVACUATION SYSTEM INTEGRATED WITH THE SAFETY SYSTEM WHEN WORKING ON A LADDER SUPPORT**
Senchenko Vladimir Aleksandrovich, Kaverzneva Tatiana Timofeevna,
Rybakov Anatoly Valeryevich, Skripnik Igor Leonidovich.....252

**APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE (*CHAT GPT*) FOR A QUALITATIVE RISK ASSESSMENT**
Byzov Anton Prokop'evich, Kolesnikov Evgeny Yuryevich,
Chernyshov Mikhail Viktorovich, Chichirina Darya Dmitrievna.....260

**A NEW APPROACH TO ASSESSING AND NORMALIZING THE EFFECT OF HEAT FLUX ON THE HUMAN BODY IN A FIRE**
Sergeeva Margarita Dmitrievna, Kolesnikov Evgeniy Yuryevich.....270

**DETERMINATION OF EQUATIONS OF REGRESSION MODELS BY ENERGY CHARACTERISTICS OF EMF IN ELECTRIC ROLLING STOCK**
Zakirova Alfiya Rezavanovna.....275

**ANALYSIS OF THE TECHNOLOGICAL EFFECTIVENESS OF MOISTURE CONCENTRATORS IN ENSURING THE PROTECTION OF WIND TURBINE BLADES**
Petrov Anton Vyacheslavovich, Kovalnogov Vladislav Nikolaevich,
Chukalin Andrey Valentinovich, Buzaeva Maria Vladimirovna.....281

**PROBLEMS OF ENRICHING INDOOR AIR WITH OXYGEN AND REMOVING CARBON DIOXIDE FROM IT**
Radionov Nikolai Vladimirovich, Sluginova Natalia Ivanovna, Kleymenova Tamara Valeryevna.....293

**PRACTICAL APPLICATIONS OF NANOMODIFICATION TECHNOLOGIES IN THE CREATION OF SUBSTANCES AND MATERIALS IN THE FIRE SAFETY SYSTEM OF OIL AND GAS ENTERPRISES**
Ivanov Alexey Vladimirovich.....300

**ANALYSIS AND ASSESSMENT OF THE POSSIBILITIES OF USING PEAT RAW MATERIALS FOR HYDROGEN PRODUCTION**
Chusov Aleksandr Nicolaevich, Politayeva Natalya Anatolyevna,
Romanov Mikhail Vasilievich, Shur Alexander Vasilievich.....309

**THE USE OF COMPUTER TECHNOLOGY IN THE SELECTION OF BALLAST WATER PURIFIERS FOR SPECIFIED POLLUTANTS**
Tsyguta Anna Nikolaevna, Golovatskaya Lesya Ivanovna,
Dzhalmukhambetova Elena Azatullaevna.....315

УДК 004.925.86
EDN: ENTGGS

# ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПЛОСКИХ КРИВЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СМЕШИВАЮЩИХ ФУНКЦИЙ, ДЕЙСТВУЮЩИХ ВДОЛЬ ОСИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ КООРДИНАТ: АЛЬТЕРНАТИВА СПЛАЙНАМ

© Автор(ы) 2024
SPIN: 8818-0590
AuthorID: 137865
ORCID: 0000-0003-4717-7682
ResearcherID: A-4799-2014
ScopusID: 6504300037

**КОСНИКОВ Юрий Николаевич,** доктор технических наук,
профессор кафедры «Информационно-вычислительные системы»
*Пензенский государственный университет*
*(440026, Россия, Пенза, улица Красная, 40, email: kosnikov@gmail.com)*

SPIN: 7960-7865
AuthorID: 1256109
ORCID: 0009-0005-5364-3258

**АБУБЕКЕРОВ Динар Рашидович,** аспирант
*Пензенский государственный университет*
*(440026, Россия, Пенза, улица Красная, 40, email: ofjordan@yandex.ru)*

**Аннотация**. Плоские неаналитические кривые имеют множество практических приложений. Они задаются набором характерных (опорных) точек. Для восстановления полной кривой по опорным точкам применяют методы интерполяции. Хорошими интерполяторами являются сплайны. Они широко применяются для геометрического моделирования кривых различной формы – замкнутых и незамкнутых, гладких и имеющих острия. Однако в задачах визуализации многие сплайновые методы можно применить, только наложив на процесс интерполяции или исходные данные ряд ограничений. В результате алгоритмы интерполяции получаются усложненными. Предлагается интерполянт на основе смешивающих функций (СФ), действующих вдоль параметрической координатной линии, которая проходит через опорные точки. Такие СФ в статье названы линейными (ЛСФ). Математическое описание интерполянта на основе ЛСФ получено путем модификации интерполянта на основе радиальных базисных функций. Каждая опорная точка кривой получает целочисленную параметрическую координату. Каждой опорной точке ставится в соответствие ЛСФ, действующая в обе стороны от опорной точки вдоль координатной линии. Интерполянт для вычисления декартовых координат текущей точки кривой записан как система из двух параметрических уравнений. Каждое уравнение представляет собой сумму слагаемых. Каждое слагаемое привязано к одной из опорных точек, участвующих в интерполяции. Слагаемое представляет собой произведение значения ЛСФ опорной точки на коэффициент ее влияния. Коэффициенты влияния опорных точек находятся из условий точного прохождения интерполянта через опорные точки. Интерполяция кривой идет по шагам. На каждом шаге формируется отрезок (сегмент) кривой, который использует конечное число опорных точек. Визуально представляемый фрагмент соединяет часть точек сегмента. Эксперимент подтвердил хорошие формообразующие возможности ЛСФ-интерполятора. Точность ЛСФ-интерполяции сравнима с точностью сплайн-интерполяции. Число сегментов составной кривой, которые нужно рассчитывать, значительно меньше числа сегментов сплайн-интерполяции. В дальнейшем предполагается исследовать количественные характеристики составной интерполированной кривой.

**Ключевые слова**: плоская кривая, опорная точка, параметрическая интерполяция, локальная интерполяция, смешивающая функция, целочисленная параметризация, сплайн-интерполяция, сплайн Кэтмулла-Рома, радиальная базисная функция, линейная смешивающая функция.

# VISUALIZATION OF FLAT CURVES USING BLENDING FUNCTIONS OPERATING ALONG THE A PARAMETRIC COORDINATE SYSTEM AXIS: AN ALTERNATIVE TO SPLINES

© The Author(s) 2024
**KOSNIKOV Yuri Nikolaevich**, doctor of technical sciences,
professor of the Department of Information and Computing Systems
*Penza State University*
*(440026, Russia, Penza, Krasnaya Street, 40, email: kosnikov@gmail.com)*
**ABUBEKEROV Dinar Rashidovich**, postgraduate student
*Penza State University*
*(440026, Russia, Penza, Krasnaya Street, 40, email: ofjordan@yandex.ru)*

**Abstract**. Plane non-analytical curves have many practical applications. They are defined by a set of characteristic (reference) points. Interpolation methods are used to restore the complete curve from the reference points. Splines are

good interpolators. They are widely used for geometric modeling of various curves – closed and unclosed, smooth and having edges. However, in visualization tasks, many spline methods can be applied only by imposing a number of restrictions on the interpolation process or the source data. As a result, the interpolation algorithms are complicated. An interpolant based on blending functions (BF) acting along a parametric coordinate line that passes through the reference points is proposed. Such BF in this paper are called linear (LBF). The mathematical description of the LBF-based interpolant is obtained by modifying the interpolant based on radial basis functions. Each reference point of the curve receives an integer parametric coordinate. Each reference point is matched with an LBF acting in both directions from the reference point along the coordinate line. The interpolant for calculating the Cartesian coordinates of the curve current point is written as a system of two parametric equations. Each equation is a sum of terms. Each term is linked to one of the reference points involved in the interpolation. The term is the product of the LBF value of the reference point by the its influence coefficient. The influence coefficients of the reference points are determined from the conditions of the exact interpolant passage through these points. The curve is interpolated in steps. At each step, a curve segment is formed, which uses a finite number of reference points. The visually represented fragment connects part of the segment points. The experiment confirmed the good shaping capabilities of the LBF interpolant. The accuracy of LBF interpolation is comparable to the accuracy of spline interpolation. The number of composite curve segments to be calculated during LBF interpolation is significantly less than the number of spline interpolation segments. In the future, it is planned to investigate the quantitative characteristics of the composite interpolated curve.

**Keywords**: plane curve, reference point, parametric interpolation, local interpolation, blending function, integer parametrization, spline interpolation, Catmull-Rom spline, radial basis function, linear blending function.

*Для цитирования: Косников Ю.Н. Визуализация плоских кривых с использованием смешивающих функций, действующих вдоль оси параметрической системы координат: альтернатива сплайнам / Ю.Н. Косников, Д.Р. Абубекеров // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 4(68). – С. 12-19. – EDN: ENTGGS.*

**Введение.** Среди задач визуализации значительное место занимает отображение неаналитических кривых на плоскости. К ним относятся границы регионов, линии одинакового уровня физической величины (изолинии), траектории движения транспортных средств, границы земельных участков, контуры береговой линии водоемов, изображения строительных конструкций и многое другое. Кроме того, многие пространственные объекты моделируются с помощью плоских криволинейных сечений. Исходными данными для визуализации, как правило, являются координаты характерных (опорных) точек, принадлежащих линиям. Эти координаты задаются разработчиками или получаются с помощью технических средств, например, ГЛОНАСС-приёмников или инструментов топографической съемки. При необходимости цифровизации и компьютерного представления заданных таким образом линий применяют методы интерполяции. С их помощью опорные точки соединяются отрезками (отсеками) той или иной формы, образуя кусочно-аналитические кривые. Промежуточные точки отсеков, взятые с некоторым шагом, служат для визуализации кривых. Как правило, расстояние между промежуточными точками берется столь малым, чтобы при соединении их отрезками прямых у наблюдателя создавалось ощущение непрерывной кривой.

Кривые, подлежащие визуализации, предъявляют к процессу интерполяции характерные требования:

– точное прохождение кривой через опорные точки;

– соответствие формы отсеков топологической тенденции хода кривой (иначе – ожиданиям разработчика);

– возможность обеспечить гладкое и негладкое сопряжение отсеков;

– отсутствие незапланированных аномалий формы: выбросов, петель, острий, разрывов кривой;

– получение точности интерполяции, позволяющей обеспечить заданный характер прохождения отсеков между опорными точками;

– минимизация временных затрат на интерполяцию, вплоть до обеспечения режима реального времени, например, для отображения анимации.

Наука знает множество методов интерполяции, в связи с чем возникает задача выбора метода для решения задач визуализации.

**Методология.** Испытанным средством интерполяции неаналитических кривых являются сплайны. Обычно это степенные многочлены, описывающие сегменты кривых и позволяющие стыковать их требуемым образом – гладко или в виде острия. Аппарат сплайнов развивается в течение более, чем ста лет и хорошо проработан. На тему сплайнов существует обширная библиография. Известны хорошие публикации, как зарубежные, так и отечественные, в том числе, по применению сплайнов в задачах визуализации. Из монографий прежних лет можно назвать [1-4], из более поздних – [5-7]. Сплайны широко применяются в геометрическом моделировании для описания конструкций самых различных форм: замкнутых и незамкнутых, гладких и имеющих острия, состоящих из линий, поверхностей и тел. Однако при анализе их формообразующих возможностей в задачах визуализации можно отметить ряд ограничений.

В графике обычно применяются сплайны третьей степени, которые представляются в параметрической форме. Одним из первых геометрических примитивов

интерполяции является сплайн Эрмита (*Hermite*) [3, 6]. Описание его отсека включает координаты двух точек – концов отсека – и две производные, задающие направления касательных в концевых точках, то есть изгибы отсека. От направлений этих касательных зависит форма отсека, но для их задания нужны какие-то дополнительные условия. Например, можно положить касательные параллельными хордам, соединяющим опорные точки, предшествующие и последующие по отношению к концевым точкам. Остается открытым вопрос о направлении касательной, проведенной через начальную точку кривой. Кроме того, для каждой касательной нужно как-то задать длину, влияющую на степень изгиба отсека. Необходимость решения этих задач усложняет алгоритм интерполяции.

Одним из самых популярных геометрических примитивов является *B*-сплайн (*B-spline*) [5-7]. Его отсек задается четырьмя опорными точками, но в общем случае не проходит ни через одну из них. Он только приближается к двум средним опорным точкам и, чтобы начать отсек от крайней опорной точки, нужно применить специальный прием – использовать кратные (повторяющиеся) опорные точки. С другой стороны, чтобы отсек точно проходил через опорные точки, нужно ввести новые опорные точки, такие, что построенный на них отсек будет точно проходить через исходные опорные точки [8]. *B*-сплайн дает гладкое сопряжение отсеков в составной кривой. Если же требуется на стыке отсеков получить острие, нужно ввести дополнительные опорные точки и в месте стыка перейти от одной последовательности опорных точек к другой. И здесь можно видеть усложнение алгоритма интерполяции. Существуют модификации *B*-сплайновой интерполяции, расширяющие формообразующие возможности сплайна, но еще больше усложняющие процесс интерполяции. Например, в публикации [9] предлагается подход к интерполяции кривых и поверхностей, основанный на применении *B*-сплайнов и генетического алгоритма.

Сходными с *B*-сплайнами свойствами обладают бета-сплайны [3, 4, 7]. Они так же, как *B*-сплайн, задаются четырьмя опорными точками и так же, в общем случае, не проходят ни через одну из них. В описании отсека бета-сплайна содержатся два числовых параметра, которые позволяют управлять формой кривой без изменения опорных точек. Однако из-за этих параметров запись отсека бета-сплайна значительно усложнена, что негативно влияет на производительность интерполяции.

*B*-сплайну не уступает в популярности сплайн Безье (Bezier) [2, 5, 7]. Описание его отсека также включает координаты четырех опорных точек. Две крайние точки являются концами отсека, две средние лежат на касательных, проведенных через концевые точки и задающих изгибы сегмента. Через средние точки отсек в общем случае не проходит. Если для описания каждого следующего отсека восстанавливаемой кривой последовательно выбирать по четыре очередные точки, то в результате интерполяции кривая не будет проходить через половину своих точек. Если же выбирать для очередного отсека две точки – начальную и конечную, то необходимо каким-то образом доопределять еще две опорные точки каждого отсека. Для этого на формообразование нужно наложить дополнительные условия, что усложняет алгоритм интерполяции.

Это ограничение снято в фундаментальном (*fundamental*) сплайне, который при определенных условиях преобразуется в сплайн Кэтмулла-Рома (*Catmull-Rom*) [3]. Его отсек точно проходит через две средние опорные точки и автоматически гладко стыкуется со следующим отсеком. Но для того, чтобы начать визуализацию кривой с первой точки, приходится применять аппарат кратных опорных точек. Кроме того, для получения негладкой стыковки отсеков нужно вводить дополнительные опорные точки [10].

Хорошими формообразующими возможностями обладает сплайн Кочанек-Бартельса (*Kochanek-Bartels*) [11]. Его описание содержит три настраиваемых параметра: натяжение, непрерывность и смещение, с помощью которых можно сформировать отсеки желаемой формы – гладкие, с остриями и петлями. Однако настройка трех параметров для каждого отсека составной кривой усложняет алгоритм интерполяции.

Сплайн Акимы (*Akima*) описывает отсек кубической кривой и задается четырьмя параметрами [12]. Для построения сплайна Акимы требуется не менее 5 точек. Интерполянт записывается в явной форме $y=f(x)$, причем координаты $x$ его опорных точек должны быть упорядочены. По этой причине сплайн Акимы нечасто применяется в задачах визуализации, так как с его помощью затруднительно сформировать кривую, описываемую многозначной функцией.

Общей особенностью перечисленных сплайнов (кроме сплайна Акимы) является формирование визуального образа отсека между двумя опорными точками. Это означает, что для визуализации протяженной кривой на $N$ опорных точках необходимо получить в лучшем случае ($N$-1) интерполянт. Хорошим примитивом для интерполяции был бы отсек, визуальная часть которого соединяет несколько опорных точек. При этом можно немного поступиться точностью интерполяции, в частности, гладкостью стыковки отсеков, поскольку для многих кривых, особенно природного происхождения, это свойство менее важно, чем точное прохождение кривой через опорные точки.

**Результаты.** Для геометрического моделирования неаналитических плоских кривых предлагается интерполянт на основе смешивающих функций (СФ), действующих вдоль параметрической координатной линии (криволинейной координатной оси). Такую СФ назовем координатно-линейной, или просто линейной смешивающей функцией (ЛСФ). Чтобы получить математическое описание интерполянта на основе ЛСФ, можно воспользоваться инструментом интерполяции с применением радиальных базисных функций (РБФ), наложив ограничение на размерность пространства интерполяции.

РБФ – хороший интерполятор, свойства которого

неплохо исследованы. Теория РБФ представлена в разных информационных источниках: монографиях, статьях, электронных документах, например, [13-15]. В последнее время традиционный геометрический и алгебраический аппарат РБФ стал дополняться средствами искусственного интеллекта, например, [16, 17]. В задачах визуализации РБФ часто применяются для моделирования и отображения криволинейных поверхностей, заданных в декартовой системе координат множеством опорных точек. Как правило, каждая опорная точка принимается за узел интерполяции, и ей ставится в соответствие некоторая функция, имеющая в этой точке экстремальное значение и изменяющая значение по мере удаления от опорной точки. Для нахождения координат промежуточной (текущей) точки поверхности учитываются «вклады», то есть уровни влияния опорных точек, окружающих промежуточную точку.

Как всякая алгебраическая функция, РБФ-интерполянт может быть записан в явной, неявной и параметрической форме. Особый интерес представляет параметрическая запись интерполянта, в которой каждая декартова координата поверхности выражается явной зависимостью от двух параметрических координат $u$ и $v$. Параметры представляют собой шаги по поверхности, образующие ортогональную криволинейную систему координат – параметрическую сетку. Опорные точки привязываются к узлам этой сетки. Параметрическая запись РБФ-интерполянта имеет вид:

$$x = \sum_{i=1}^{N} \lambda_{xi}\, \phi(r_i), \quad (1)$$

$$y = \sum_{i=1}^{N} \lambda_{yi}\, \phi(r_i), \quad (2)$$

$$z = \sum_{i=1}^{N} \lambda_{zi}\, \phi(r_i), \quad (3)$$

$$r_i = \sqrt{(u - u_i)^2 + (v - v_i)^2},$$

где $x$, $y$, $z$ – декартовы координаты промежуточной точки;

$u_i$ и $v_i$ – параметрические координаты $i$-й опорной точки;

$r_i$ – декартово расстояние от промежуточной (текущей) точки до $i$-й опорной точки, измеренное на параметрической сетке;

$\phi(r_i)$ – радиальная базисная функция, значение которой зависит от расстояния $r_i$;

$\lambda_{xi}$, $\lambda_{yi}$, $\lambda_{zi}$ – коэффициенты влияния $i$-й РБФ по координатам $x$, $y$, $z$, соответственно;

$N$ – количество опорных точек, влияющих на текущую точку.

*РБФ* – интерполяция имеет хорошие формообразующие свойства. Она обеспечивает точное прохождение поверхности через опорные точки. Для этого на коэффициенты влияния $\lambda_{xi}$, $\lambda_{yi}$, $\lambda_{zi}$ накладываются ограничения. Ограничения представляются в виде трех систем уравнений – по одному для каждой декартовой координаты. Это условия точного прохождения поверхности через опорные точки. Например, для координаты $x$:

$$\sum_{i=1}^{N} \lambda_{xi}\, \phi(r_{ij}) = x_j, \quad j = 1 \,..N, \quad (4)$$

где $j$ – номер опорной точки, для которой составляется условие прохождения поверхности-интерполянта;

$r_{ij}$ – расстояние между $j$-й опорной точкой и остальными ($i = 1 \,..\, N$) опорными точками поверхности.

Выражение (4) при переборе $j$ дает СЛАУ – систему из $N$ линейных алгебраических уравнений. Аналогично составляются СЛАУ для координат $y$ и $z$. Решение трех СЛАУ дает коэффициенты влияния РБФ $\lambda_{xi}$, $\lambda_{yi}$, $\lambda_{zi}$, обеспечивающие прохождение поверхности через опорные точки. Эти коэффициенты подставляются в интерполянт (1) – (3). На практике применяются различные виды РБФ [18-21], наиболее популярными из которых являются приведенные в таблице 1.

*Таблица 1 – Некоторые разновидности радиальных базисных функций*

| Наименование РБФ | Математическое описание | Наименование РБФ | Математическое описание |
|---|---|---|---|
| Мультиквадрик | $\Phi(r) = \sqrt{c + (\varepsilon r)^2}$ | Инверсный мультиквадрик | $\Phi(r) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\varepsilon r)^2}}$ |
| Гауссиан | $\Phi(r) = e^{-(\varepsilon r)^2}$ | Тонкопленочный сплайн | $\Phi(r) = r^2 log(r)$ |

В таблице 1: $\varepsilon$ – коэффициент сглаженности – число, влияющее на скорость изменения РБФ, а $c$ – константа, подбираемая при интерполяции.

Для случая интерполяции плоских кривых можно адаптировать аппарат РБФ-интерполяции, применив зависимость координат $x$, $y$ текущей точки кривой от одного параметра $t$, который представляет собой шаги по кривой, то есть вводится одномерная параметрическая система координат. Каждая ($i$-я) опорная точка кривой получает некоторую параметрическую координату $t_i$. Каждой опорной точке ставится в соответствие ЛСФ – линейная смешивающая функция, действующая в обе стороны от опорной точки вдоль координатной линии $t$. Тогда описание интерполянта принимает вид

$$x = \sum_{i=1}^{N} \lambda_{xi}\, \phi(r_i), \quad (5)$$

$$y = \sum_{i=1}^{N} \lambda_{yi}\, \phi(r_i), \quad (6)$$

$$r_i = |t - t_i|,$$

где обозначения имеют тот же смысл, что и в (1 – 3). Коэффициенты влияния $\lambda_{xi}$, $\lambda_{yi}$ $i$-й ЛСФ находятся, исходя из условия прохождения интерполированной кривой через опорные точки, как это делается в случае РБФ, то есть с участием выражений, аналогичных (4). Только расстояние $r_{ij}$ между $i$-й и $j$-й опорными точками находятся по-другому:

$$r_{ij} = |t_i - t_j|. \quad (7)$$

Подстановка коэффициентов влияния в (5), (6)

дает ЛСФ-интерполянт.

Применение ЛСФ-интерполянта имеет своеобразие. При построении интерполянта на всех заданных опорных точках возникает глобальная интерполяция. Она образует гладкую кривую, точно проходящую через все опорные точки, однако в случае большого количества этих точек нахождение коэффициентов влияния требует больших временных затрат на решение СЛАУ большой размерности. Чтобы повысить производительность интерполяции и упростить ее алгоритм, нужно ограничить число опорных точек, то есть применить локальную интерполяцию. Однако при этом возможно снижение качества интерполяции. Возникает вопрос выбора числа опорных точек, устанавливающего компромисс между характеристиками интерполяции.

Если разбить множество исходных опорных точек кривой на подмножества, провести интерполяцию в пределах каждого подмножества и визуализировать сегмент на всех точках подмножества, то гладкое сопряжение сегментов, в общем случае, не получится. В этом случае каждый сегмент-интерполянт формируется независимо и имеет свою форму. Очевидно, для гладкой стыковки подмножества опорных точек должны пересекаться, но визуализация должна выполняться лишь на средних точках отсека.

Обозначив количество опорных точек интерполянта (сегмента) $N$, а количество опорных точек, на которых строится визуальный образ сегмента, $M$, можно указать соответствие (схему) количеств точек, участвующих в вычислениях и участвующих в визуализации, как $N \mapsto M$. Назовем ее схемой расчета-визуализации. Чем больше $N$, тем лучше форма восстанавливаемой кривой, но сложнее вычисления. Чем больше $M$, тем выше производительность интерполяции, но хуже стыковка сегментов с соседними. Минимальная схема 4↦2 сходна по структуре со сплайн-интерполяцмей, но не удовлетворяет требованиям по форме отсека и гладкости стыковки. Далее возможны схемы 5↦3, 6↦4, 7↦3, 7↦5 и т.д. Свойства таких интерполянтов нуждаются в изучении. В статье лишь сравниваются формообразующие свойства ЛСФ- и сплайн-интерполяции.

**Обсуждение.** Для ЛСФ-интерполяции выбрана схема расчета-визуализации 5↦3 и последовательная параметризация. Интерполянт имеет вид выражений (5), (6), в которых $N$=5. Для вычисления коэффициентов влияния в соответствии с выражением (4) параметр $t$ изменяется в интервале от 1 до 5, а для визуализации сегмента по выражениям (5), (6) – в интервале от 2 до 4. В качестве ЛСФ выбрана биквадратная функция

$$\phi(r_i) = \left(1 - \left(\frac{t-t_i}{t_{max}}\right)^2\right)^2, \; t=1, 2, ..., 5 \qquad (8)$$

где $t_{max}$ – половина зоны влияния ЛСФ в параметрических координатах.

Для сравнения с ЛСФ-интерполяцией взята интерполяция с применением сплайна Кэтмулла-Рома, так как она характеризуется простотой алгоритма и хорошим формообразованием. Описание сегмента сплайна в параметрической форме имеет вид:

$$x = \frac{1}{2}\left((-t + 2t^2 - t^3)x_1 + (2 - 5t^2 + 3t^3)x_2 + \right. \qquad (9)$$
$$\left. + (t + 4t^2 - 3t^3)x_3 + (-t^2 + t^3)x_4\right),$$

$$y = \frac{1}{2}\left((-t + 2t^2 - t^3)y_1 + (2 - 5t^2 + 3t^3)y_2 + \right. \qquad (10)$$
$$\left. + (t + 4t^2 - 3t^3)y_3 + (-t^2 + t^3)y_4\right), \quad t = 0\,..\,1,$$

где $x_1$, ..., $x_4$, $y_1$, ..., $y_4$ – декартовы координаты четырех опорных точек сегмента;

$t$ – параметр.

Для формирования тестовой кривой выбрана зависимость

$$x(t) = t - 2sin(t) - 2,$$

$$y(t) = 1 - 2cos(t) + 0.1t^2 - 5, \quad t = 1, 2, \ldots, 11,$$

график которой имеет участки медленного, среднего и быстрого изменения кривизны, как это показано на рисунке 1. На кривой заданы опорные точки, отстоящие друг от друга на разные декартовы расстояния, но имеющие последовательные параметрические координаты от $t = 1$ до $t = 11$.

Значения параметра и декартовых координат опорных точек $P_i$ приведены в таблице 1.

Кривая разбита на четыре отсека. Обозначения опорных точек, входящих в отсеки, и их соответствие опорным точкам интерполянта схемы 5↦3 показаны в таблице 2.

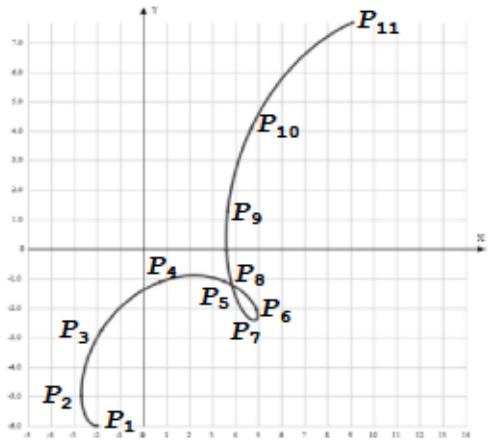



*Рисунок 1 – Вид тестовой кривой с опорными точками*

*Таблица 1 – Параметрические и декартовы координаты опорных точек тестовой кривой*

| $P_i$ | $P_1$ | $P_2$ | $P_3$ | $P_4$ | $P_5$ | $P_6$ | $P_7$ | $P_8$ | $P_9$ | $P_{10}$ | $P_{11}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $t_i$ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| $x_i$ | -2.0 | -2.683 | -1.819 | 0.718 | 3.514 | 4.918 | 4.559 | 3.686 | 4.021 | 6.176 | 9.088 |
| $y_i$ | -6.0 | -4.981 | -2.768 | -1.120 | -1.093 | -2.067 | -2.320 | -0.608 | 2.691 | 5.922 | 7.678 |

*Таблица 2 – Соответствие обозначений опорных точек кривой опорным точкам отсека и участка его визуализации*

| Номер *i* опорной точки интерполянта | Опорные точки расчета отсеков | | | | Опорные точки визуализации отсеков | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | $P_1$ | $P_3$ | $P_5$ | $P_7$ | $P_1$ | | | |
| 2 | $P_2$ | $P_4$ | $P_6$ | $P_8$ | $P_2$ | $P_4$ | $P_6$ | $P_8$ |
| 3 | $P_3$ | $P_5$ | $P_7$ | $P_9$ | $P_3$ | $P_5$ | $P_7$ | $P_9$ |
| 4 | $P_4$ | $P_6$ | $P_8$ | $P_{10}$ | $P_4$ | $P_6$ | $P_8$ | $P_{10}$ |
| 5 | $P_5$ | $P_7$ | $P_9$ | $P_{11}$ | | | | $P_{11}$ |

Как видно из таблицы 2, в визуализации первого и последнего отсеков принимают участие не только средние, но и крайние опорные точки. Это делается, чтобы «прижать» кривую к начальной и конечной точкам. В них не нужно обеспечивать гладкую стыковку отсеков с соседними, а вычисление их координат выполняется корректно, так как на них влияют все опорные точки отсека.

Значения коэффициентов влияния для интерполянта (5), (6) находятся из условия прохождения кривой-интерполянта через опорные точки. Например, система уравнений, необходимая для определения коэффициентов влияния $\lambda_{xi}$ опорных точек первого отсека и построенная по данным таблицы 1 с применением функции (8) в соответствии с (4) и (7), имеет вид:

$$1 \cdot \lambda_{x1} + \frac{225}{256}\lambda_{x2} + \frac{144}{256}\lambda_{x3} + \frac{49}{256}\lambda_{x4} + 0 \cdot \lambda_{x5} = -2.0,$$
$$\frac{225}{256}\lambda_{x1} + 1 \cdot \lambda_{x2} + \frac{225}{256}\lambda_{x3} + \frac{144}{256}\lambda_{x4} + \frac{49}{256}\lambda_{x5} = -2.683,$$
$$\frac{144}{256}\lambda_{x1} + \frac{225}{256}\lambda_{x2} + 1 \cdot \lambda_{x3} + \frac{225}{256}\lambda_{x4} + \frac{144}{256}\lambda_{x5} = -1.819,$$
$$\frac{49}{256}\lambda_{x1} + \frac{144}{256}\lambda_{x2} + \frac{225}{256}\lambda_{x3} + 1 \cdot \lambda_{x4} + \frac{225}{256}\lambda_{x5} = 0.718,$$
$$0 \cdot \lambda_{x1} + \frac{49}{256}\lambda_{x2} + \frac{144}{256}\lambda_{x3} + \frac{225}{256}\lambda_{x4} + 1 \cdot \lambda_{x5} = 3.514.$$

Коэфициенты СЛАУ представляют собой значения биквадратной СФ для соответствующих значений параметра $t$. Значение $t_{max}$ выбрано равным четырем, рекомендации по его обоснованному выбору нуждаются в разработке. Решение СЛАУ дает значения коэффициентов влияния:

$$\lambda_{x1} = 93.223170,\ \lambda_{x2} = -398.749393,$$
$$\lambda_{x3} = 585.672000,\ \lambda_{x4} = -387.658904,$$
$$\lambda_{x5} = 91.112059.$$

Аналогично находятся коэффициенты влияния для опорных точек первого отсека по координате y и для остальных отсеков. Следует обратить внимание, что левая часть СЛАУ для всех отсеков остается неизменной, меняется только набор свободных членов (координат опорных точек).

После подстановки коэффициентов влияния в выражения (5), (6) выполнена интерполяция и визуализация промежуточных точек кривой. Результат показан на рисунке 2, где кривая ЛСФ-интерполяции наложена на тестовую кривую. Визуальный анализ показывает, что сколько-то значимые расхождения этих кривых заметны лишь на первом и последнем отсеках (места показаны на рисунке 2 стрелками)., хотя окончательный вывод о точности интерполяции даст только количественная оценка.

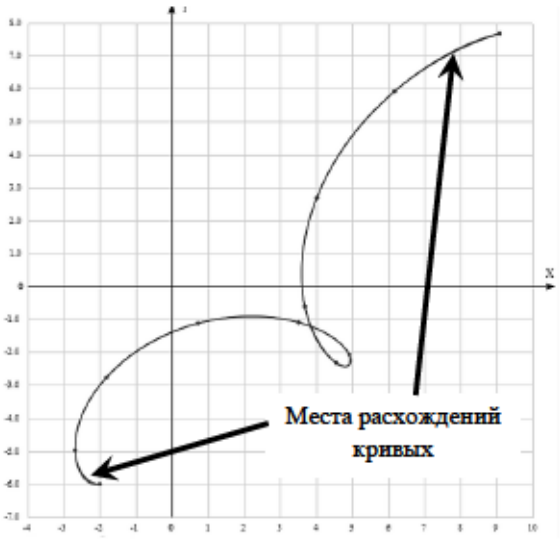



*Рисунок 2 – Результат ЛСФ-интерполяции тестовой кривой*

Отсек сплайна Кэтмулла-Рома в соответствии с выражениями (9), (10) строится на четырех опорных точках, причем визуализируется отрезок между двумя средними опорными точками. Это означает, что для интерполяции тестовой кривой, имеющей 11 опорных точек, нужны 8 отсеков. Однако при этом кривая будет построена между второй и предпоследней опорными точками. Чтобы «прижать» ее к первой и последней точкам, нужно применить аппарат кратных опорных точек, то есть первый отсек строить на точках $P_1 - P_1 - P_2 - P_3$, а последний – на точках $P_9 - P_{10} - P_{11} - P_{11}$. Тогда число отсеков Кэтмулла-Рома возрастет до 10. Результат сплайн-интерполяции показан на рисунке 3, где сплайновая составная кривая наложена на кривую ЛСФ-интерполяции.

Изображения опорных точек взяты с тестовой кривой.

Визуальный анализ показывает, что ЛСФ-интерполянт по своим формообразующим возможностям не уступает сплайн-интерполянту, а на крайних участках интерполяции и превосходит его. В дальнейшем нужно дать количественную оценку расхождения двух интерполяционных кривых. В то же время число сегментов ЛСФ-интерполяции более чем в два раза меньше числа сегментов сплайна.

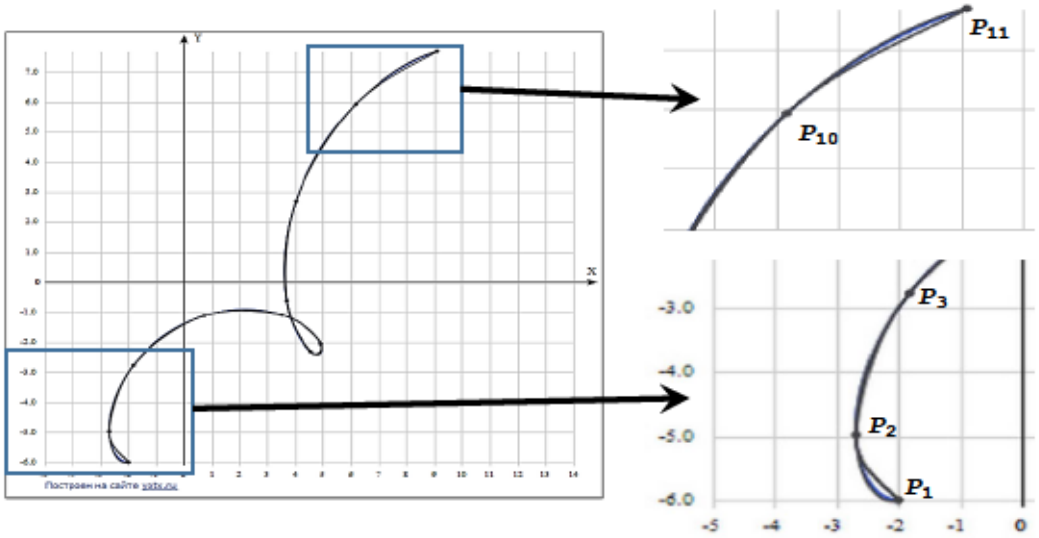



*Рисунок 3 – Иллюстрация сравнения результатов сплайн-интерполяции и ЛСФ-интерполяции*

**Выводы.** Визуальный анализ показывает, что предлагаемый ЛСФ-интерполятор обладает хорошими формообразующими возможностями. Точность ЛСФ-интерполяции сравнима с точностью сплайн-интерполяции. Число сегментов составной кривой, которые нужно рассчитывать, значительно меньше числа сегментов сплайн-интерполяции. При вычислении характеристик ЛСФ-интерполянта необходимо решать СЛАУ. Если выбрать последовательную параметризацию, матрица коэффициентов СЛАУ при переходе от одного отсека к следующему не меняется, меняется лишь матрица свободных членов (координат опорных точек), что упрощает алгоритм интерполяции и повышает ее производительность. Количественные характеристики точности интерполяции и гладкости стыковки сегментов составной интерполированной кривой нуждаются в выяснении. Точность интерполяции можно определить по среднеквадратическому отклонению или метрике Хаусдорфа, а критерий гладкости стыковки следует разработать. Кроме того, в ходе дальнейших исследований нужно определить возможности ЛСФ-интерполяции при различной расстановке опорных точек, а также сформулировать для нее рекомендации по рациональному выбору схемы расчета–визуализации. Еще одной задачей на будущее является создание простого алгоритма визуализации кривых с остриями, изломами, разрывами.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Rogers D.F., Adams J.A. Mathematical Elements for Computer Graphics / 2nd Edition. – McGraw-Hill, 1989. – 512 p.
2. Bartels R.H., Beatty J.C., Barsky B.A. An Introduction to Splines for Use in Computer Graphics and Geometric Modeling. – Morgan Kaufmann Publishers, 1995 – 476 p.
3. Херн Д., Бейкер М.П. Компьютерная графика и стандарт OpenGL, 3-е издание.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2005. – 1168 с.
4. Шикин Е.В., Плис А.И. Кривые и поверхности на экране компьютера. Руководство по сплайнам для пользователей. – М.: Диалог-МИФИ, 1996. – 240 с.
5. Vince J. Mathematics for Computer Graphics / Fifth Edition. – London: Springer-Verlag Ltd. – 2017. – 512 p.
6. Стечкин С.Б., Субботин Ю.Н. Сплайны в вычислительной математике / Изд. 2. – М.: URSS, 2022. – 248 с.
7. Голованов Н.Н. Геометрическое моделирование: учебное пособие / Н.Н. Голованов. – М.: КУРС: ИНФРА-М, 2024. – 400 с. – URL: https://znanium.ru/catalog/product/2131753.
8. Hoang, T.H. Applying the B-spline interpolation in designing the movement trajectory of a dynamic object / T.H. Hoang, Yu.N. Kosnikov // Dong Thap University Journal of Science. – Vietnam: Dong thap University. – 2017. – № 27. – P. 100-105.
9. Komar A., Riegler M., Preiner R., Augsdörfer U. Genetic Subdivision Curve and Surface Reconstruction // Proceedings of 32. International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision (WSCG 2024). – Czech Republic, Plzen, June 3-6, 2024. – P. 315-323. URL: https://www.

doi.org/10.24132/CSRN.3401.34.

10. Kosnikov Y.N., Zimin A.P., Novikov A.V. Information Technique for Smooth and Non-Smooth Curves Modeling // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – Vladivostok, 2020. – P. 1-4. doi: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271619 https://ieeexplore.ieee.org/document/9271619.

11. Kochanek D.H.U., Bartels R.H. Interpolating splines with local tension, continuity, and bias control // SIGGRAPH '84: Proceedings of the 11th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, January 1984. – P. 33-41. URL: https://doi.org/10.1145/800031.808575.

12. Akima H. A new method of interpolation and smooth curve fitting based on local procedures // J. Assoc. Comput. Machinery, 1970. – Vol. 17. – № 4. – P. 589-602. DOI: 10.1145/321607.321609.

13. Buhmann M.D. Radial Basis Functions: Theory and Implementations. – Cambridge University Press, 2009. – 272 p.

14. Cella U., Patrizi D., Porziani S., Virdung T., Biancolini M.E. Radial Basis Functions Theory Background. Encyclopedia. Available online: https://encyclopedia.pub/entry/29056.

15. De Marchi S., Perracchione E. Lectures on radial basis functions. [Электронный ресурс], URL: https://www.math.unipd.it/~demarchi/RBF/LectureNotes.pdf.

16. Pandey A., Yadav V., Nagar R., Chaudhury S. LISR: Learning Linear 3D Implicit Surface Representation Using Compactly Supported Radial Basis Functions // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2024. – Vol. 38. – P. 4415-4423. Doi: 10.1609/aaai.v38i5.28239.

17. Yao S., Song W., Wang C.A Comparative Study of Neural Surface Reconstruction for Scientific Visualization. – arXiv:2407.20868 [cs.GR], 2024. URL: https://arxiv.org/abs/2407.20868.

18. Wendland H. Piecewise polynomial, positive defined and compactly supported radial functions of minimal degree // Advances in Computational Mathematics, 1995. – Volume 4, Issue 1. – Pp. 389-396. URL: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:36452865.

19. Buhmann M. A new class of radial basis functions with compact support // Mathematics of Computation, 2001. – Vol. 70. – №233. – P. 307-318. DOI: 10.1090/s0025-5718-00-01251-5.

20. Skala V. RBF Interpolation with CSRBF of Large Data Sets // International Conference on Computational Science, ICCS 2017 / Procedia Computer Science, 2017. – Vol. 108. – Pp. 2433-2437. – Электронный ресурс. – URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187705091730621X.

21. Menandro F. Two new classes of compactly supported radial basis functions for approximation of discrete and continuous data / Engineering Reports, 2019. – Vol 1. [Электронный ресурс], doi: 10.1002/eng2.12028. – URL: https://doi.org/10.1002/eng2.12028.

*Статья поступила в редакцию 15.09.2024*
*Статья принята к публикации 13.12.2024*

УДК 004.8
EDN: VXTJSC

# СОЦИО-КИБЕРФИЗИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ

©Автор(ы) 2024

SPIN: 3024-1393
AuthorID: 183204
ORCID: 0000-0001-9299-1005
ResearcherID: Y-3115-2018
ScopusID: 56613172200

**БОДИН Олег Николаевич,** доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Биомедицинская инженерия»
*Пензенский государственный технологический университет*
*(440039, г. Пенза, проезд Байдукова / улица Гагарина, д. 1а/11, e-mail: bodin_o@inbox.ru)*

SPIN: 3519-3682
AuthorID: 271281
ORCID: 0000-0002-3726
ResearcherID: V-7481-2018
ScopusID: 57205663503

**БЕЗБОРОДОВА Оксана Евгеньевна,** доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Техносферная безопасность» Политехнический институт
*Пензенский государственный университет*
*(440026, Россия, г. Пенза, улица Красная, 40, e-mail: oxana243@yandex.ru)*

SPIN: 7718-0729
AuthorID: 1250197
ORCID: 0009-0003-9352-5876
eLIBRARY ID: 58800354

**ЖИГАЧЕВ Василий Маратович,** кандидат технических наук,
докторант кафедры «Техническое управление качеством»
*Пензенский государственный технологический университет*
*(440039, г. Пенза, проезд Байдукова/улица Гагарина, д. 1а/11, e-mail: zhigachevvm@mail.ru)*

SPIN: 9459-8170
AuthorID: 1122812
ORCID: 0009-0000-1224-1770
ResearcherID: JCW-6897-2023

**МИШИНА Кристина Дмитриевна,** аспирант,
кафедра «Техносферная безопасность» Политехнический институт
*Пензенский государственный университет*
*(440026, Россия, г. Пенза, улица Красная, 40, e-mail: kristina_mishina_1998@mail.ru)*

**Аннотация.** При цифровой трансформации промышленности необходимы принципиально новые способы организации, связанные с изменением места и роли человека в технологической цепочке. Учитывая постоянно возрастающий объем обрабатываемых данных и требования к скорости принятия управляющих решений, человек проигрывает при внедрении оборудования цифрового производства, управляемого интеллектуальными системами в режиме реального времени. Целью исследования является – разработка социо-киберфизической системы мониторинга и управления на основе мультиагентной технологии. Методология исследования основана на использовании междисциплинарного подхода, базирующегося на фундаментальных научных положениях таких отраслей, как системный анализ, автоматическое управление процессами, технологии управления качеством, математическое моделирование. Результатами работы являются классификация (систематизация) элементов социо-киберфизических систем; разработка структуры мультиагентной подсистемы в составе социо-киберфизической системы и модели управления; разработка технологии социо-киберфизической системы мониторинга и управления. Разработана социо-киберфизическая система мониторинга и управления на основе мультиагентной технологии. Применение мультиагентной технологии позволяет при интеллектуальной обработке данных: оптимизировать процессы мониторинга и управления за счет иерархии интеллектуальных агентов; сократить время обработки данных за счет клонирования агентов и параллельных вычислений; повысить точность обработки данных за счет использования цифрового двойника объекта и его оптимизационной модели.

**Ключевые слова:** социо-киберфизическая система, мониторинг и управление, мультиагентная технология, интеллектуальный агент.

# SOCIO-CYBERPHYSICAL SYSTEMS FOR MONITORING AND CONTROL OF OBJECTS

©The Author(s) 2024

**BODIN Oleg Nikolaevich,** doctor of technical sciences, professor,
head of the department «Biomedical Engineering»
*Penza State Technological University*
*(440039, Penza, Baidukova proezd/Gagarin Street, 1a/11, e-mail: bodin_o@inbox.ru)*
**BEZBORODOVA Oksana Evgenievna**, doctor of technical sciences, docent,
head of the department «Technosphere Safety» Polytechnic Institute
*Penza State University*
*(440026, Russia, Penza, Krasnaya Street, 40, e-mail: oxana243@yandex.ru)*
**ZHIGACHEV Vasily Maratovich**, candidate of technical sciences,
doctoral student at the department «Technical Quality Management»
*Penza State Technological University*
*(440039, Penza, Baidukova proezd/Gagarin Street, 1a/11, e-mail: zhigachevvm@mail.ru)*
**MISHINA Kristina Dmitrievna,** postgraduate student department «Technosphere Safety» Polytechnic Institute
*Penza State University*
*(440026, Russia, Penza, Krasnaya Street, 40, e-mail: kristina_mishina_1998@mail.ru)*

**Abstract.** With the digital transformation of industry, fundamentally new ways of organizing are needed, related to changing the place and role of a person in the technological chain. Given the ever-increasing volume of processed data and the requirements for the speed of management decision-making, a person loses out when implementing digital production equipment controlled by intelligent systems in real time. The purpose of the research is to develop a socio-cyberphysical monitoring and management system based on multi-agent technology. The research methodology is based on the use of an interdisciplinary approach based on the fundamental scientific positions of such industries as system analysis, automatic process control, quality management technologies, mathematical modeling. The results of the work are the classification (systematization) of elements of socio-cyberphysical systems; development of the structure of a multi-agent subsystem as part of a socio-cyberphysical system and management model; development of technology for a socio-cyberphysical monitoring and management system. A socio-cyberphysical monitoring and management system based on multi-agent technology has been developed. The use of multi-agent technology allows for intelligent data processing: to optimize monitoring and management processes due to the hierarchy of intelligent agents; to reduce data processing time due to agent cloning and parallel computing; to increase the accuracy of data processing by using the digital twin of the object and its optimization model.

**Keywords:** socio-cyberphysical system, monitoring and management, multi-agent technology, intelligent agent.

*Для цитирования: Бодин О.Н. Социо-киберфизические системы для мониторинга и управления объектами / О.Н. Бодин, О.Е. Безбородова, В.М. Жигачев, К.Д. Мишина // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 4(68). – С. 20-29. – EDN: VXTJSC.*

**Введение.** При цифровой трансформации промышленности необходимы принципиально новые способы организации, связанные с изменением места и роли человека в технологической цепочке. Учитывая постоянно возрастающий объем обрабатываемых данных и требования к скорости принятия управляющих решений, человек проигрывает при внедрении оборудования цифрового производства, управляемого интеллектуальными системами в режиме реального времени. Для выравнивания возможностей искусственного интеллекта и человека при управлении технологическими процессами и производствами многие авторы [1, 2, 3, 4] предлагают перейти от классических автоматических систем управления, у которых отсутствуют возможности оперативно подстраиваться под изменяющиеся условия, которые чаще всего обладают только функцией автоматического управления объектами различной природы происхождения, выполняют при этом типовые операции к более совершенным системам управления. На сегодняшний день наиболее перспективными системами управления являются киберфизические системы, являющиеся объединением технологических и информационных процессов и технологий. Эти системы работают в масштабе реального времени и, при взаимодействии с внешней средой, способны подстраиваться (адаптироваться) под ее изменения. В [5, 6] киберфизическая система (КФС) определена как совокупность информационных (базы данных, компьютерное и коммуникационное оборудование, программное обеспечение), физических (инженерных, экологических) и человеческих компонентов. Такие системы состоят из разнородных объектов: природных и технических систем, сети датчиков, управляющих контроллеров, вычислительных средств, объединяемых в единое целое средствами интернет (интранет).

Учитывая, что КФС автоматизированная система, человек сохраняется в контуре управления. Поэтому, взаимодействуя с информационными и физическими компонентами, он может выступать как оператор, управляющий системой, элемент системы (объект исследования) или элемент внешней среды (наблюдатель-контролер). Такое взаимодействие преобразует

киберфизические системы в социо-киберфизические (СКФС) [7].

Распространение СКФС породило проблему обеспечения качества и безопасности их функционирования. Поэтому стала актуальной разработка новых и совершенствование существующих методов и средств для СКФС как систем управления, функционирующих в режиме реального времени. Целью СКФС является установление отклонений наблюдаемых параметров объектов от их теоретических или нормальных значений и формирования сигнала о необходимости управляющего воздействия (минимизации выявленных отклонений), а также прогноз состояния объекта для обоснованного снижения степени неопределенности, риска при принятии решений. В основе любого прогноза лежит использование модели объекта, в частности математической. Поэтому разработка новых математических моделей объектов и новых способов использования уже существующих математических моделей также представляют теоретический и практический интерес.

Целью исследования является – разработка СКФС мониторинга и управления на основе мультиагентной технологии.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

– классификация (систематизация) СКФС;

– разработка структуры мультиагентной подсистемы в составе СКФС и модели управления;

– разработка технологии СКФС мониторинга и управления.

**Методология.** Учитывая особенности «включения» человека в СКФС, он может выступать как оператор, управляющий системой, элемент системы (объект исследования) или элемент внешней среды (наблюдатель) (табл. 1).

*Таблица 1 – Классификация социо-киберфизических систем по степени взаимодействия человека с информационными и физическими компонентами*

| Выполняемые функции / Элемент структуры СКФС | Человек | | | |
|---|---|---|---|---|
| | оператор | объект исследования | оператор и объект исследования | наблюдатель-контролер |
| Объект управления | – | + | + | – |
| Элемент подсистемы управления | + | – | + | – |
| Элемент внешней среды | + | + | + | + |

Выступая в качестве оператора, человек является элементом подсистемы управления, работая в ручном или автоматизированном режиме. В этих режимах он включен в контур СКФС и либо сам задает и осуществляет управляющие команды, либо подтверждает варианты управляющих команд, сформированных СКФС. Быстродействие такой системы определяется, в большей степени, быстродействием человека.

Возможен вариант работы СКФС, когда человек является ее объектом исследования. И если такое исследование проходит в автоматическом режиме, то измерение, обработку результатов и формирование управляющей команды выполняет СКФС без возможности человека вмешаться в ход процесса. Если такое исследование происходит в автоматизированном режиме, то есть человек включен в контур СКФС и как объект исследования, и как элемент подсистемы управления.

Если рассматривать человека как наблюдателя-контролера СКФС (автоматический режим работы), то он исключен из контура управления СКФС и не может вмешаться в процессы мониторинга и управления. Поэтому все управляющие и корректирующие команды формирует и выполняет СКФС, действуя по заданной программе, зачастую не учитывая нюансы изменения состояния объекта управления.

Учитывая, что СКФС характеризуются значительной сложностью, ее возможности обуславливаются используемыми методами и средствами управления. Для этого наиболее предпочтителен распределенный подход к управлению объектом, на основе мультиагентной технологии [8, 9]. При использовании в составе СКФС мультиагентной подсистемы появляется возможность выбирать наиболее подходящее к текущей ситуации состояние объекта и средства и методы его достижения на основе заданных граничных условий.

Структуру мультиагентной подсистемы формируют исходя из состава и иерархии системы управления, характером связей между ее узлами и блоками, интенсивностью работы, выбранными целевыми управляющими функциями, множествами предпочтительных и допустимых состояний объекта управления, способами информационного обмена. Предложенные авторами общая структурная схема СКФС, архитектура и функциональная схема самореализации мультиагентной подсистемы рассмотрены в [10-12].

В соответствии с [13] СКФС управления содержит следующие подсистемы (рис. 1): измерения параметров объекта, оценки состояния объекта, управления состоянием объекта. СКФС управления является многомерной динамической системой, так как при взаимодействии с внешней средой объект управления обменивается с ней материальными (М), энергетическими (Э) и информационными (И) потоками. Измеряемые значения контролируемых СКФС параметров содержат случайную составляющую – помехи $\eta(t)$, которые искажают результаты измерений, а также оценки и команды, отдаваемые подсистемой управления.

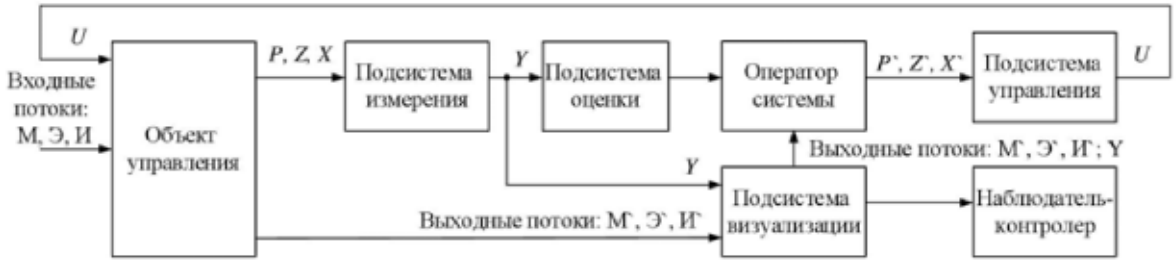



*Рисунок 1 – Общая структурная схема социо-киберфизической системы*

При использовании мультиагентной подсистемы управления в составе СКФС необходимо учитывать особенности объекта управления. Для успешного взаимодействия с мультиагентной подсистемой объект управления необходимо оснастить рецепторами, позволяющими воспринимать информацию из внешней среды (различного рода датчики и сенсоры, контрольно-измерительную аппаратуру), и эффекторами – исполнительными блоками, реализующими управляющие воздействия (программируемые логические контроллеры (ПЛК)). Для обработки сигналов рецепторов и эффекторов в состав системы необходимо включить вычислительный модуль, содержащий блок обработки полученных данных и память. Вычислительный модуль – это сервер для сбора, обработки и хранения данных таких как структура мультиагентной подсистемы, измеренные параметры объекта, функции и задачи интеллектуальных агентов, база знаний и т.д. С сервера, в случае сбоя в системе, интеллектуальный агент получает данные.

Мультиагентная подсистема является множеством интеллектуальных агентов, характеризующихся определенным состоянием, и взаимодействующих виртуально. Для выполнения поставленных задач они имеют возможность по заданному динамическому расписанию формировать и распускать коалиции, клонировать интеллектуальных агентов.

В СКФС как интеллектуальные агенты, то есть программно-аппаратные сущности, рассматриваются все подсистемы (рис. 1), причем подсистемы оценки состояния объекта и управления объекта выступают в качестве коалиций интеллектуальных агентов, объединенных для выполнения задач оценки состояния и управления объектом.

СКФС оперирует следующими массивами информации: входящая информация (множество *P*), информация о состоянии объекта управления (множество *Z*), выходная информация (множество *X*); измерительные данные, совмещенные с помехами (множество *Y*); результаты оценки: входных сигналов (множество *P*), состояния объекта управления (множество *Z*), выходных сигналов (множество *X*); сформированные управляющие сигналы (множество *U*).

Содержание баз данных СКФС зависит от специфики объекта управления. Для идентификации и выполнения команд объект управления оснащен соответствующими приборами, оборудованием и узлами. Так как объект управления является многопараметрическим, то в каждый момент времени $t_i$ он характеризуется множествами: входных параметров $\{p_1(t), p_2(t), \ldots, p_k(t)\}$, где $k$ – размерность входного процесса объекта, параметров состояния объекта $\{z_1(t), z_2(t), \ldots, z_n(t)\}$, где $n$ – размерность объекта управления и выходных параметров $\{x_1(t), x_2(t), \ldots, x_m(t)\}$, где $m$ – размерность выходного процесса. Чаще всего контроль и управление осуществляют по наиболее значимым параметрам, наиболее полно характеризующим объект, изменение которых ведет к изменению других параметров.

Подсистема измерения параметров объекта управления получает с системы датчиков и первичных преобразователей информацию о контролируемых параметрах в момент времени $t_i$. Эта информация искажена помехами и представлена в виде множества $\{y_1(t), y_2(t), \ldots, y_l(t)\}$, где $l$ – размерность этого множества.

Подсистема оценки состояния объекта, анализируя результаты измерения $Y$ с использованием алгоритмов фильтрации и обработки информации, получает оценки: входного процесса $P$, состояния объекта управления $Z$ и выходного процесса $X$ в виде множеств $\hat{P} = \{\hat{p}_1(t), \hat{p}_2(t), \ldots, \hat{p}_k(t)\}$, $\hat{Z} = \{\hat{z}_1(t), \hat{z}_2(t), \ldots, \hat{z}_n(t)\}$, $\hat{X} = \{\hat{x}_1(t), \hat{x}_2(t), \ldots, \hat{x}_m(t)\}$.

Подсистема оценки состояния объекта для оценки состояния объекта управления в момент времени $t_i$ использует дополнительную информацию. Это задаваемые на основе технологических (уставки), справочных (физические и химические константы, формулы пересчета в вспомогательные единицы измерения и пр.), нормативных документов предельные (граничные) значения по каждому контролируемому параметру. Эта информация для настройки СКФС может задаваться оператором системы вручную или формироваться подсистемой оценки по заложенным при создании правилам и моделям.

Данные с выхода подсистемы оценки состояния объекта $\hat{P}$, $\hat{Z}$, $\hat{X}$ подают в подсистему управления, и они являются исходными для корректировки управляющих воздействий $U=\{u_1(t), u_2(t), \ldots, u_p(t)\}$ – команды в соответствии с результатами оценки состояния объекта ($p$ – размерность управляющего воздействия). Эту информацию подают в подсистему визуализации в удобной для восприя-

тия пользователем форме – в виде шкал, графиков, коротких текстовых заметок, сигнальных кнопок и прочего. Пользователями этой информации является наблюдатель-контролер (при работе системы в автоматическом режиме), или оператор системы (при работе в автоматизированном режиме).

Учитывая возможность изменения значений контролируемых параметров при длительной работе объекта управления возникает необходимость их корректировки. Эту коррекцию возможно осуществлять в автоматическом режиме при наличии в подсистеме динамической математической модели объекта управления высокой точности, то есть цифрового двойника объекта управления (ЦД-1) с переменными коэффициентами. В подсистему заложены коэффициенты ЦД-1 для исходного (номинального) состояния объекта управления. Эта модель определяет разработку алгоритмов автоматической работы СКФС. В процессе эксплуатации состояние объекта управления меняется и возникают отклонения значений контролируемых параметров объекта управления по отношению к номинальным, заложенным в ЦД-1. Чтобы определить поправки необходимо сформировать идентифицирующее воздействие на объект управления. Оно представляет собой сигналы малой амплитуды определенной, заранее известной формы (импульс или синус, например), не искажающие основные управляющие воздействия. Зная значения характеристик идентифицирующих сигналов, по ЦД-1 определяют параметры сигнала на выходе подсистемы измерения параметров объекта. При обнаружении разницы между определенным и измеренным значениями делают вывод об отклонении в состоянии объекта управления, не учтенном ЦД-1. Варьируя коэффициентами ЦД-1 устраняют разницу между определенными и измеренными значениями. По этому принципу в ходе длительной работы системы ее модель непрерывно корректируют, подгоняя под изменяющиеся условия.

Наличие математической модели объекта управления дает возможность оптимизировать алгоритм управления объектом. Условием возможности этого процесса является наличие оптимизационной модели (ЦД-2), которую можно получить на основе ЦД-1. Для этого ЦД-1 необходимо обеспечить целевой функцией F, задаваемой при настройке СКФС. Параметрами целевой функции могут быть, например, минимизация образования отходов, выбросов, сбросов при работе объекта управления, минимизация его энергозатрат и пр. Используя ЦД-1 и целевую функцию задают вектор управляющего воздействия $U^0=\{u_1^0(t), u_2^0(t), \ldots, u_p^0(t)\}$, при котором целевой параметр имеет предпочтительное значение. Оптимизировать управление состоянием объекта можно по одному контролируемому параметру или по их совокупности (Парето-оптимальное состояние, когда нельзя улучшить значение ни одного параметра, одновременно не ухудшая значения как минимум одного из остальных) или по комплексному показателю состояния объекта.

Таким образом, работа СКФС управления заключается в определении и оценке состояния объекта управления, а также определении необходимости корректировки состояния. Для решения этих задач авторами предлагается мультиагентная управляющая подсистема.

**Результаты.** Мультиагентная подсистема имеет сложную архитектуру: модули веб-платформа, коммуникаций, управления интеллектуальными агентами, баз данных, а также приемо-передающий модуль. Информационные потоки между модулями в мультиагентной системе приведены на рисунке 2 [15].

Модуль веб-платформы построен на основе клиент-серверной архитектуры. Именно такая архитектура позволяет операторам системы и администраторам использовать необходимые данные, а интеллектуальным агентам, выполненным на индивидуальных модулях веб-платформы, обеспечивает доступ к базам данных через специальное программное обеспечение. Через клиент-серверное приложение интеллектуальные агенты получают доступ к пользовательскому интерфейсу в случае необходимости активации агентов. В подсистеме действуют агенты двух видов: внешние и внутренние [15].

Внутренние интеллектуальные агенты (оценки состояния объекта, настройки оценки состояния объекта, формирования баз данных, оптимизации состояния объекта) выполняют задания внутри мультиагентной подсистемы и не имеют права выхода во внешнюю сеть.

Внешние интеллектуальные агенты имеют права выхода во внешнюю среду и выполняют специальные задания вне среды мультиагентной подсистемы.

Базы данных накапливают информацию, состоящую из данных оперативного анализа, предписаний для каждого из интеллектуальных агентов, набор служебных данных. Базы данных размещают либо на сервере, либо на рабочей станции (в зависимости от конфигурации системы). Они содержат измерительную, справочную, расчетную информацию об объекте, результаты ее обработки. Для работы интеллектуальных агентов необходимы поисковые и оперативные предписания, служебные данные.

На рисунке 3 приведена функциональная схема самореализации разработанной мультиагентной подсистемы. Запуск интеллектуального агента осуществляет модуль управления агентами по расписанию хранящемуся в базе данных. Во время работы интеллектуального агента этот модуль управляет очередью решаемых агентом задач за счет распределенной передачи сообщений.

В передаче сообщений принимает участие модуль коммуникации. Он же осуществляет взаимодействие между агентами различных уровней при выполнении запроса.

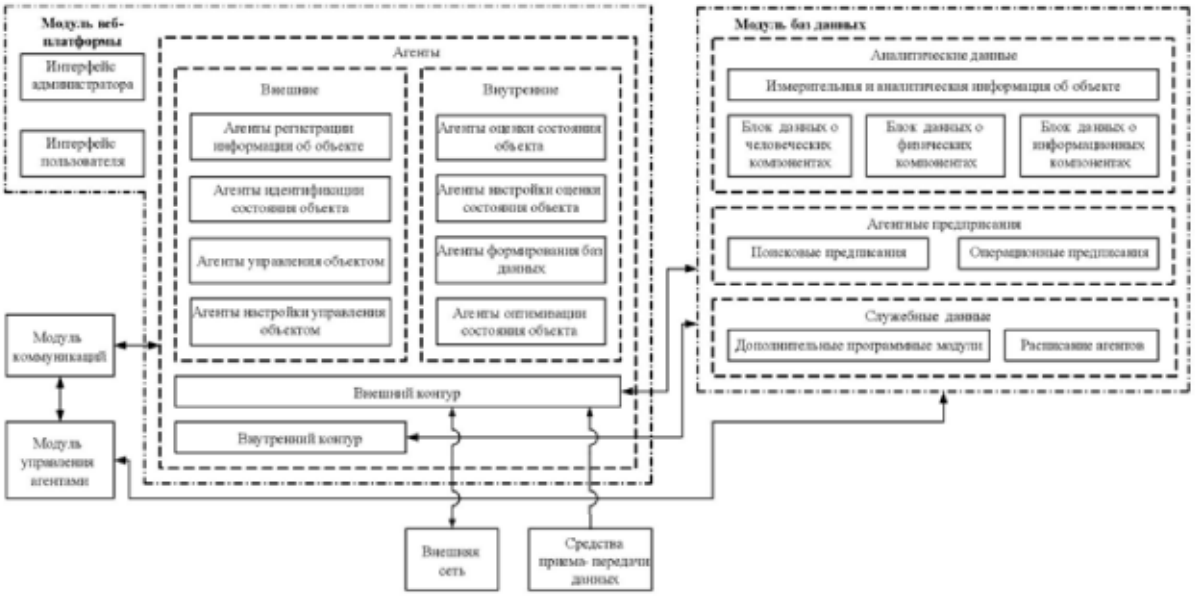



*Рисунок 2 – Архитектура мультиагентной подсистемы в составе социо-киберфизической системы*

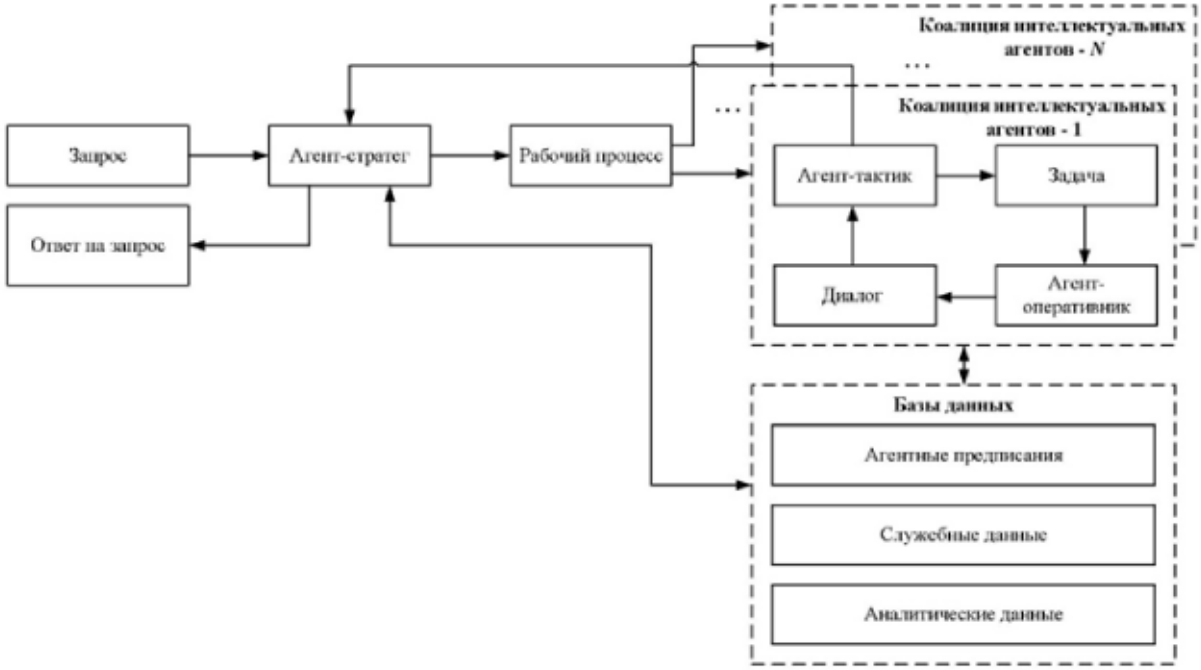



*Рисунок 3 – Функциональная схема самореализации мультиагентной подсистемы*

Алгоритм работы СКФС, имеющей в составе мультиагентную подсистему, можно описать используя формальный математический аппарат, основу которого составляет вариант темпоральной или динамической логики [14]. В соответствии с формально-логическим описанием определение состояния объекта управления и необходимости его корректировки осуществляется аппаратно-программной реализацией иерархической мультиагентной подсистемы.

Инициация начала работы этой подсистемы происходит либо по запросу оператора системы (автоматизированный режим), либо самой СКФС (автоматический режим) по заданной программе (табл. 2, 3).

При работе СКФС в автоматизированном режиме необходимость выполнения корректирующего управляющего воздействия подтверждается или отменяется оператором системы. При работе СКФС в автоматическом режиме подтверждение наблюдателя-контролера для выполнения корректирующего управляющего воздействия не требуется.

На рисунке 4 приведена диаграмма взаимодействия интеллектуальных агентов при формировании управляющего воздействия [16].

*Таблица 2 – Реализация алгоритма работы мультиагентной подсистемы [15]*

| | | |
|---|---|---|
| Запрос | Определить состояние объекта управления и необходимость его корректировки | |
| Цель 1 | Сформировать иерархическую мультиагентную подсистему, содержащую непустое конечное множество интеллектуальных агентов $AG$ и непустое конечное множество состояний объекта $S$ | $MAS = \{AG,S\}$ |
| Задача 1.1 | Сформировать конечное множество интеллектуальных агентов $AG$, содержащее три непустых подмножества интеллектуальных агентов: | $AG = \{AG^{str}, AG^{takt}, AG^{oper}\}$ |
| | интеллектуальных агентов-стратегов $AG^{str}$ | $AG^{str} = \{ag_1^{str}\}$ |
| | интеллектуальных агентов-тактиков $AG^{takt}$ | $AG^{takt} = \{ag_1^{takt}, \dots, ag_n^{takt}\}$ |
| | интеллектуальных агентов-оперативников $AG^{oper}$ | $AG^{oper} = \{ag_1^{oper}, \dots, ag_m^{oper}\}$ |
| Задача 1.2 | Запустить мультиагентную подсистему (интеллектуального агента-стратега) $ag_1^{str}$ | |
| Задача 1.3 | Преобразовать запрос в совокупность задач (сформулировать цели) | $Quest = \{Goal_1, \dots, Goal_x\}$ |
| Задача 1.4 | Сформулировать задачи для интеллектуальных агентов-оперативников | $Goal_x = \{task_1, \dots, task_y\}$ |
| Задача 1.5 | Разработать план для решения каждой задачи | $Plans = \{Plan_1, \dots, Plan_z\}$, |
| Задача 1.6 | Провести моделирование результатов осуществления каждого плана | $Model = \{models \mid model : P_k \times A_{ag_1^{str}} \to 2^{P_k \times [0,1]}\}$ |
| Задача 1.7 | Выбрать план для решения каждой задачи с максимальной вероятностью ее решения | $model: P_k \times A_{ag_1^{str}} \to 2^{P_k \times [0,1]}$ |
| Задача 1.8 | Запустить интеллектуального агента-тактика $AG^{takt}$ | |
| Задача 1.9 | Определить приоритет задачи, принять и обработать запрос на формирование коалиций при невозможности решения задачи одним интеллектуальным агентом-оперативником | $coal: P_k \times task_k \to 2^{P_k}$ |
| Задача 1.10 | Сформировать интеллектуальных агентов-оперативников для решения каждого плана (индивидуально или в составе коалиции интеллектуальных агентов-оперативников) | $AG^{oper} = \{ag_1^{oper}, \dots, ag_m^{oper}\}$ |
| Задача 1.11 | Распределить задачи между интеллектуальными агентами-оперативниками или их коалициями | $task = \left\{\left(task_k, w_k \mid task_k : P_k \to [0,1], w_k \in [0,+\infty]\right)\right\}$ |
| Задача 1.12 | Запустить интеллектуального агента-оперативника $AG^{takt}$ | |
| Задача 1.13 | Определить значения параметров объекта управления, решить поставленную задачу на основе определенных значений в соответствии с планом | $task_k: Plans \times P_k \to 2^{P_k}$ |
| Задача 1.14 | В случае невозможности самостоятельно решить задачу отправить запрос на формирование коалиций для решения задачи | $ag_m^{oper} = \langle ag_m^{oper}, task_y \rangle$ |
| Задача 1.15 | Обобщить результаты решения отдельных задач | $task_k: Plans \times P_k \to 2^{P_k \times [0,1]}$ |
| Задача 1.16 | Получить и оценить отчеты о выполнении планов | $plan_k: 2^{Goals} \times Models \to Plans$ |
| Задача 1.17 | Отправить результаты выполнения планов интеллектуальному агенту-стратегу | |
| Задача 1.18 | Обобщить результаты выполнения планов и определить достигнута ли цель | $Goal_k: P_k \to [0;1]$ |
| Задача 1.19 | Оценить состояние объекта управления как | $S = \{S_1, S_2, \dots, S_q\} == S^{РАБ} \cup S^{РАБ}$ |
| | соответствующее нормативным требованиям и не требующее корректировки | $S = S^{РАБ}$ |
| | несоответствующее нормативным требованиям и требующее корректировки | $S = S^{РАБ}$ |
| Задача 1.20 | Сформировать вектор управляющих воздействий для коррекции состояния объекта управления | $U^0 = \{u_1^0(t), u_2^0(t), \dots, u_p^0(t)\}$ |

*Таблица 3 – Действия интеллектуальных агентов при определении состояния объекта управления и необходимости его корректировки [15]*

<table>
<tr><td>Цель 2</td><td colspan="3">Определить состояние объекта управления</td></tr>
<tr><td>Задача 2.1</td><td colspan="3">Выбрать контролируемые параметры состояния объекта управления (либо оператор системы, либо подсистема управления)</td></tr>
<tr><td>Задача 2.2</td><td colspan="3">Отправить запросы интеллектуальным агентам-оперативникам (интеллектуальным датчикам) о проверке и восстановлении работоспособности</td></tr>
<tr><td>Задача 2.3</td><td colspan="3">Измерить значения контролируемых параметров состояния объекта управления</td></tr>
<tr><td>Задача 2.4</td><td colspan="3">Зафиксировать значения контролируемых параметров состояния объекта управления</td></tr>
<tr><td>Задача 2.5</td><td colspan="3">Отправить запросы интеллектуальным агентам-оперативникам (расчетным модулям программ) о проверке и восстановлении работоспособности</td></tr>
<tr><td>Задача 2.6</td><td colspan="3">Рассчитать значения контролируемых параметров состояния объекта управления</td></tr>
<tr><td>Задача 2.7</td><td colspan="3">Зафиксировать значения контролируемых параметров состояния объекта управления</td></tr>
<tr><td>Задача 2.8</td><td colspan="3">Сформировать матрицу результатов определения состояния объекта управления $Y=\{y_1(t), y_2(t), \ldots, y_i(t)\}$ в момент времени $t_i$</td></tr>
<tr><td>Задача 2.9</td><td colspan="3">Определить (рассчитать) комплексный показатель состояния многопараметрического объекта управления $\Delta_i(t) = f(Y)$ в момент времени $t_i$</td></tr>
<tr><td>Цель 3</td><td colspan="3">Оценить состояние объекта управления</td></tr>
<tr><td>Задача 3.1</td><td colspan="3">Для каждого контролируемого параметра состояния объекта управления задать предельные (граничные) значения (одно или несколько – при мультиграничном контроле)</td></tr>
<tr><td>Задача 3.2</td><td colspan="3">Сравнить измеренные и/или рассчитанные значения контролируемых параметров состояния объекта управления с предельными (граничными) значениями</td></tr>
<tr><td>Задача 3.3</td><td colspan="3">Качественно и количественно оценить и зафиксировать результаты оценки значений контролируемых параметров объекта управления в момент времени $t_i$</td></tr>
<tr><td>Задача 3.4</td><td colspan="3">Качественно и количественно оценить и зафиксировать результаты оценки значения комплексного показателя состояния многопараметрического объекта управления в момент времени $t_i$</td></tr>
<tr><td>Цель 4</td><td colspan="3">Определить необходимость корректировки состояния объекта управления</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Задача 4.1</td><td colspan="3">Задать целевую функцию для оптимальной корректировки состояния объекта управления</td></tr>
<tr><td>4.1.1 по одному значимому параметру состояния объекта управления</td><td>4.1.2 по совокупности параметров состояния объекта управления</td><td>4.1.3 по комплексному показателю состояния многопараметрического объекта управления</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Задача 4.2</td><td colspan="3">Сформировать вектор управляющих воздействий $U^0 = \{u_1^0(t), u_2^0(t), \ldots, u_p^0(t)\}$ при котором целевая функция имеет наилучшее значение</td></tr>
<tr><td>4.2.1 $|U^0 - U| \rightarrow min$.</td><td>4.2.2 $F=\{U^1, U^2, \ldots, U^i\} \rightarrow min$;<br>или $F=\{U^1, U^2, \ldots, U^i\} \rightarrow max$.</td><td>4.2.3 $|\Delta^0 - \Delta| \rightarrow min$.</td></tr>
</table>

**Обсуждение.** В таблице 2 приведен пример реализации алгоритма работы мультиагентной подсистемы. Запрос формулируется как «Определить состояние объекта управления и необходимость его корректировки» и разбивается на группы задач. Последовательно-параллельное достижение цели приводит либо к подтверждению сохранения состояния объекта управления, либо к формированию управляющего воздействия корректирующего состояние объекта управления.

По описанному в таблице 2 алгоритму работы мультиагентной подсистемы при выполнении запроса «Определить состояние объекта управления и необходимость его корректировки» интеллектуальные агенты последовательно-параллельно решают три группы задач достигая поставленные цели (цель 2, цель 3, цель 4). Достижение этих целей приводит либо к подтверждению сохранения состояния объекта управления, либо к формированию управляющего воздействия корректирующего состояние объекта управления (см. таблицу 3).

Диаграмма взаимодействия интеллектуальных агентов наглядно иллюстрирует последовательность и очередность их действий и показывает, как:

– при работе интеллектуального агента-стратега происходит переработка запроса лица, принимающего решения в цель работы мультиагентной подсистемы, как цель разбивается на задачи и для

каждой из них разрабатывается план выполнения;

– при работе интеллектуального агента-тактика распределяются задачи между интеллектуальными агентами-оперативниками, оцениваются их возможности решения поставленных задач;

– при работе интеллектуального агента-оперативника решаются задачи и как для их скорейшего решения выполняются операции клонирования и объединения в коалиции, что повышает вероятность и скорость решения задач.

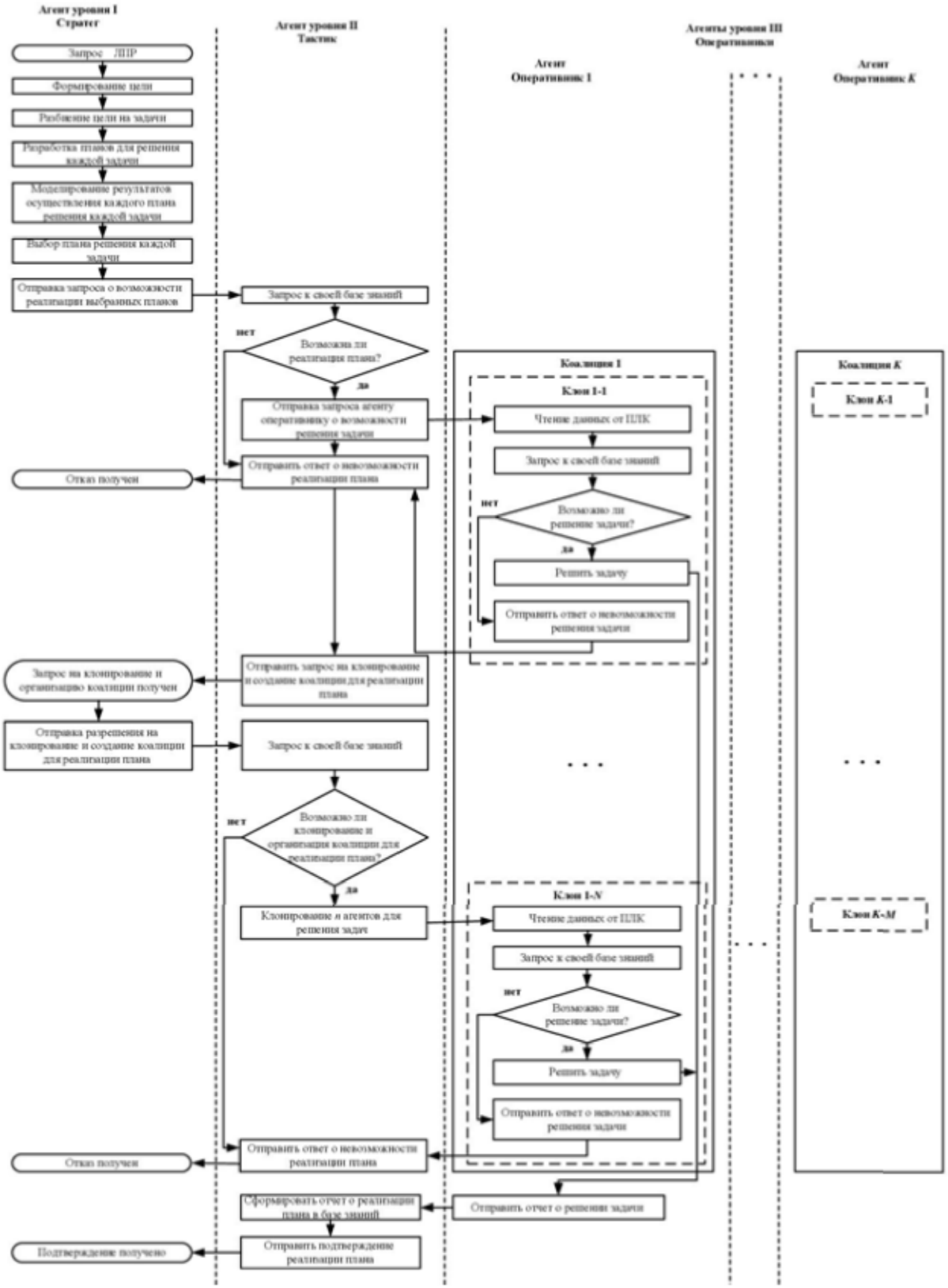



*Рисунок 4 – Диаграмма взаимодействия интеллектуальных агентов при формировании управляющего воздействия*

**Выводы.** В статье представлен новый подход к мониторингу и управлению объектами на основе СКФС, позволяющей объединить в единое целое информационные, физические и человеческие компоненты. В работе введены определения компонентов СКФС, представлена их классификация по степени взаимодействия человека с информационными и физическими компонентами. Приведена общая структурная схема СКФС. Предложены архитектура мультиагентной подсистемы в составе социо-киберфизической системы и функциональная схема самореализации мультиагентной подсистемы. Показано, что необходимость создания мультиагентной подсистемы продиктована изменением места и роли человека в технологической цепочке как важнейшим фактором при разработке систем управления.

Таким образом, разработана СКФС мониторинга и управления на основе мультиагентной технологии. Применение мультиагентной технологии позволяет при интеллектуальной обработке данных:

– оптимизировать процессы мониторинга и управления за счет иерархии интеллектуальных агентов;

– сократить время обработки данных за счет клонирования агентов и параллельных вычислений;

– повысить точность обработки данных за счет использования цифрового двойника объекта и его оптимизационной модели.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Пешкин, К.С. Назначение и перспективы развития киберфизических систем управления технологическими процессами // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2023. – №1 (77). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/naznachenie-i-perspektivy-razvitiya-kiberfizicheskih-sistem-upravleniya-tehnologicheskimi-protsessami (дата обращения: 04.10.2024).

2. Юдина, М.А. Индустрия 4. 0: перспективы и вызовы для общества // Государственное управление. Электронный вестник. 2017. №60. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/industriya-4-0-perspektivy-i-vyzovy-dlya-obschestva (дата обращения: 04.10.2024).

3. Степановская, И.А. Управление развитием крупномасштабных систем на цифровой платформе социо-киберфизических систем / И.А. Степановская, А.Д. Цвиркун // Управление развитием крупномасштабных систем mlsd'2020: Труды тринадцатой Международной конференции, Москва, 28-30 сентября 2020 года / Под общей редакцией С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. – Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2020. – С. 1747-1752. – DOI 10.25728/mlsd.2020.1747.

4. Балюк, А.А. Многоагентная аутентификация цифровых двойников в киберфизических системах / А.А. Балюк, О.А. Финько // Вопросы кибербезопасности. – 2022. – № 5(51). – С. 100-113. – DOI 10.21681/2311-3456-2022-5-100-113.

5. Рогозинский Г.Г. Киберфизические объекты и их модели для мультисенсорного представления данных / Г.Г. Рогозинский // T-comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2017. – Т.11, № 11. – С. 68-73.

6. Смышляева, А.А. Современные технологии в Индустрии 4.0 – киберфизические системы / А.А. Смышляева, К.М. Резникова, Д.В. Савченко // Интернет-журнал «Отходы и ресурсы», 2020. –№3. https://resources.today/PDF/02INOR320.pdf (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/02INOR320.

7. Куприяновский, В.П. Киберфизические системы как основа цифровой экономики / В.П. Куприяновский, Д.Е. Намиот, С.А. Синягов // International Journal of Open Information Technologies. – 2019. – № 4. – С. 31-42.

8. Бурков В.Н. и др. Механизмы управления: Управление организацией: планирование, организация, стимулирование, контроль. / Под ред. Новикова Д.А. – М.: Ленанд, 2013. – 216 с.

9. Modi P.J. et al. An asynchronous complete method for distributed constraint optimization // AAMAS. – 2003. – V. 3. – P. 161-168.

10. Безбородова, О.Е. Мультиагентные технологии в медицинских информационных системах / О.Е. Безбородова, М.Н. Крамм, К.А. Ожикенов, А.К. Ожикенова / под редакцией О.Н. Бодина. – Алматы: Лантар Трейд, 2021. – 314 с.

11. Безбородова, О.Е. Мультиагентная обработка данных мониторинга территориальной техносферы / О.Е. Безбородова // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2022. – № 3. – С. 20-28. – DOI: 10.21685/2307-5538-2022-3-2.

12. Безбородова О.Е. Иерархическая структура мультиагентной системы / О.Е. Безбородова // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2022. – № 2. – С. 29-38. – DOI: 10.21685/2307-5538-2022-2-4.

13. Паршаков, С.И. Основы управления техническими процессами и системами: учебное пособие / С.И. Паршаков, М.В. Ерпалов; научный редактор Ю.В. Инатович; Министерство образования и науки Российской Федерации, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2017. – 148 с.

14. Emerson E.A. Temporal and modal logic // Handbook of Theoretical Computer Science. Amsterdam: North-Holland Pub. Co., 1990. Vol. B: Formal Models and Sematics. – P. 995-1072.

15. Безбородова О.Е. Разработка методологии информационно-измерительной системы определения экологического благополучия человека: дис. ... докт. техн. наук. – Пенза, 2023. – Режим доступа: https://dissov.pnzgu.ru/files/dissov.pnzgu.ru/2023/bezborodova/dissertaciya_bezborodovoy_o_e_.pdf.

16. Bezborodova O.E. Improving data collection and processing efficiency by using hierarchies of intelligent agents in multi-agent systems / O.E. Bezborodova, O.N. Bodin, D.V. Paschenko // 2021 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1061 012009.

*Статья поступила в редакцию 19.10.2024*
*Статья принята к публикации 13.12.2024*

УДК: 004.942
EDN: IQDGBK

# КВАНТОВО-КЛАССИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТОСТРИКЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ НА МИКРОУРОВНЕ

© Автор(ы) 2024
SPIN: 7082-9215
AuthorID: 607402
ORCID: 0000-0003-0622-5502
ScopusID: 57352554300

**КАРПУХИН Эдуард Владимирович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Математика и физика»
*Пензенский государственный технологический университет*
*(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/улица Гагарина, 1А/11, e-mail: edvar1@rambler.ru)*

**Аннотация.** В данной статье рассматриваются численные схемы моделирования квантовых многоэлектронных систем на основе комбинирования квантовых и классических методов, что позволяет эффективно решать широкий круг задач за приемлемое время и с достаточно высокой точностью. Основной проблемой при использовании квантовых вычислений является недостаточный уровень современного технологического развития в этом направлении: отсутствие доступных полнофункциональных квантовых ЭВМ, небольшое число известных эффективных квантовых алгоритмов и научных работ в этом направлении. Однако, существующие эмуляторы квантовых ЭВМ позволяют проводить разработку и тестирование новых квантовых численных методов для решения частных задач моделирования многоатомных систем и обосновать теоретическую возможность использования этих методов в общем случае в будущем, когда появятся полноценные квантовые ЭВМ. Описывается разработка алгоритма, подходящего для исследования магнитострикционных явлений на микроуровне, с помощью квантово-классического метода, подходящего для реализации на современной классической ЭВМ. Предлагаемый алгоритм, основан на модификации метода Залки-Везнера решения уравнения Шредингера путем использования преобразования Троттера-Сузуки и квантового преобразования Фурье, реализуемых на квантовом эмуляторе. Приводится структура программного комплекса, и результаты исследования известных магнитострикционных материалов с его помощью.

**Ключевые слова:** квантово-классические численные методы, исследование магнитострикционных явлений на микроуровне, квантовые эмуляторы, квантовые алгоритмы.

# QUANTUM-CLASSICAL ALGORITHM FOR STUDYING MAGNETOSTRICTIVE PHENOMENA AT THE MICROLEVEL

© The Author(s) 2024
**KARPUKHIN Eduard Vladimirovich**, candidate of technical sciences,
associate professor sub-department of «Mathematics and physics»
*Penza State Technological University*
*(440039 Russia, Penza, pr. Baidukova / ul. Gagarina, 1a /11, e-mail: edvar1@rambler.ru)*

**Abstract.** This article discusses numerical schemes for modeling quantum many-electron systems based on a combination of quantum and classical methods, which allows one to effectively solve a wide range of problems in an acceptable time and with sufficiently high accuracy. The main problem with using quantum computing is the insufficient level of modern technological development in this area: the lack of available full-featured quantum computers, a small number of known efficient quantum algorithms and scientific papers in this area. However, existing quantum computer emulators allow one to develop and test new quantum numerical methods for solving particular problems of modeling polyatomic systems and to justify the theoretical possibility of using these methods in the general case in the future, when full-featured quantum computers appear. The article describes the development of an algorithm suitable for studying magnetostriction phenomena at the microlevel using a quantum-classical method suitable for implementation on a modern classical computer. The proposed algorithm is based on a modification of the Zalka-Wesner method for solving the Schrödinger equation by using the Trotter-Suzuki transform and the quantum Fourier transform, implemented on a quantum emulator. The structure of the software package and the results of studying known magnetostrictive materials with its help are presented.

**Keywords:** quantum-classical numerical methods, study of magnetostrictive phenomena at the microlevel.

*Для цитирования: Карпухин Э.В. Квантово-классический алгоритм исследования магнитострикционных явлений на микроуровне / Э.В. Карпухин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 4(68). – С. 30-34. – EDN: IQDGBK.*

**Введение.** При моделировании магнитострикционных явлений на микроуровне возникает задача решения уравнения Шредингера (УШ). В настоящее время известно множество численных методов его решения [1, 13, 16, 20, 21]. Обычно, решение этой задачи предполагает использование

обычных современных ЭВМ, вычислительных мощностей которых вполне хватает для получения результата с любой заданной точностью. В то же время, при необходимости исследования различных сложных квантовых систем, например, проведения моделирования поведения системы из множества микрочастиц или взаимосвязи физических явлений происходящих на уровне молекулярной или атомной структуры вещества, такие методы часто приводят к появлению значительной погрешности, из-за невозможности с их помощью учитывать квантовые эффекты [6, 7-11]. Для устранения этого недостатка в работах некоторых авторов [3, 4, 14, 17-21] описывается относительно новых подход к решению указанной проблемы, основанный на комбинированном использовании классических численных методов и квантовых.

Такие работы, как правило, носят теоретический характер, т.к. полноценного квантового оборудования на сегодняшнем этапе развития техники не существует. С другой стороны, для проведения некоторых видов квантовых вычислений известны квантовые эмуляторы [17] – программы на языке Q#, которые могут быть выполнены на обычной, классической ЭВМ, позволяя реализовать при этом алгоритмы, предназначенные для квантовой.

Обобщенная структура комбинированной информационной системы, использующей квантовый эмулятор, показана на рисунке 1. Она состоит из двух модулей: эмулятора и модуля основной программы, который управляет модулем квантовых вычислений. Использование такой системы при исследовании квантовых явлений позволит сочетать основные достоинства классических и квантовых подходов, за счет реализации в ее составе комбинированных квантово-классических численных методов (ККЧМ).

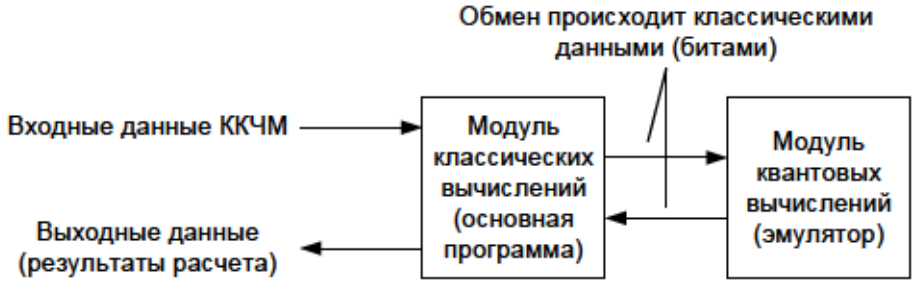



*Рисунок 1 – Обобщенная структура информационной системы комбинированных вычислений*

Целью исследования является разработка нового алгоритма ККЧМ для моделирования физических систем квантовыми методами на современном классическом оборудовании. Достижение этой цели обеспечит повышение эффективности моделирования за счет квантового ускорения численных методов, а так же даст возможность использовать этот и другие схожие алгоритмы на полноценном квантовом оборудовании в будущем.

В настоящей статье приводится описание алгоритма ККЧМ, применяемого к решению УШ, для исследования физических свойств материалов, в частности сплавов Гейслера вида Ni-Mn-Ga [5], на микроуровне.

**Методология.** Рассмотрим временное УШ:

$$\hat{H}\Psi = \left(-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + U(\bar{r},t)\right)\Psi(\bar{r},t) = j\hbar\frac{\partial\Psi(\bar{r},t)}{\partial t}, \quad (1)$$

где $\Psi(\bar{r},t), U(\bar{r},t)$ – волновая функция и потенциальная энергия частицы, находящейся в точке пространства с координатами $(x,y,z)$ и радиус-вектором $\bar{r} = x\bar{i} + y\bar{j} + z\bar{k}$ в момент времени $t$; $\nabla = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ – оператор Лапласа; $m$ – масса частицы, $\hbar$ – приведенная постоянная Планка.

Решение уравнения (1) на квантовой ЭВМ может быть выполнено методом Залки-Визнера [18], который применим, в том числе и для многоатомных систем. Общая схема численного решения УШ этим методом следующая:

Записать формально точное решение УШ (1) $\Psi$ в виде вектора $|\psi(t)\rangle$:

$$|\psi(t)\rangle = e^{-j\hat{H}t}|\psi(0)\rangle \quad (2)$$

Задать начальное состояние $|\psi(0)\rangle$, момент времени $t_f$, для которого требуется определить решение и шаг дискретизации $\Delta t$, такой, чтобы $i\Delta t = t_f$ для некоторого целого $i$. Положить $|\psi_0\rangle = |\psi(0)\rangle$, $i=0$.

Построить квантовую схему U $\Delta t$ в виде:

$$U_{\Delta t} = \mathrm{IQFT}\exp\left(-\frac{j}{\hbar}\frac{p^2}{2m}\Delta t\right)\mathrm{QFT}\exp\left(-\frac{j}{\hbar}V(\bar{r})\Delta t\right), \quad (3)$$

где $V(\bar{r})$ – потенциальная энергия квантовой системы частиц, *QFT,IQFT* – прямое и обратное квантовое преобразование Фурье

Начало итерационного процесса.

На одном шаге итерации вычисляется $|\psi_{i+1}\rangle = U_{\Delta t}|\psi_i\rangle$ и происходит увеличение счетчика i на единицу.

Итерационный процесс останавливается при выполнении условия $i\Delta t \geq t_f$. Возвращается результат $|\psi(t_f)\rangle = |\psi_i\rangle$.

Этот алгоритм выполняется на квантовой ЭВМ за полиномиальное время, является наиболее универсальным и подходит для моделирования широкого круга квантовых систем, в том числе и магнитострикционных явлений. Результат получается

с ошибкой $\varepsilon$, величина которой может быть получена из оценки:

$$\left|\langle\psi(t_f)\right| e^{-j\hat{H}t_f}\left|\psi(0)\rangle\right|^2 \geq 1-\varepsilon. \quad (4)$$

Метод Залки-Везнера без модификаций может быть реализован на классическом компьютере с использованием программного комплекса на рисунке 1, но он подойдет только для моделирования квантовой системы с небольшим числом частиц. Для повышения его эффективности предлагается использовать ККЧМ на основе преобразования Троттера-Сузуки [18], которое может быть выражено следующими рекурсивными формулами:

$$\left(\prod_{i=1}^{m} e^{-jH_i t/2n}\prod_{i=m}^{1} e^{-jH_i t/2n}\right)^n = e^{-jHt} + O\left(\frac{m^2t^2}{n^2}\right) = U_2(t),$$

$$U_{2k}(t) = [U_{2k-2}(s_k t)]^2 U_{2k-2}([1-4s_k]t)[U_{2k-2}(s_k t)]^2 =$$

$$= e^{-jHt} + O\left(\frac{(mt)^{2k+1}}{n^2}\right), \qquad s_k = \left(4 - 4^{1/(2k-1)}\right)^{-1}. \quad (5)$$

Применение этого преобразования позволяет повысить точность аппроксимации при задействовании тех же самых вычислительных ресурсов. Наглядно и упрощенно продемонстрировать эффективность метода Троттера-Сузуки можно с помощью иллюстрации на рисунке 2. Если условно считать, что квантовый алгоритм должен из состояния 1 перейти в состояние 2, а длины сторон треугольника *A, B* и $U_{2k}$ *(t)* – суммарным объемом вычислительных ресурсов, необходимых для этого перехода, то кратчайшим путем является $U_{2k}$ *(t)*, представляющим собой преобразование Троттера-Сузуки порядка *2k*.

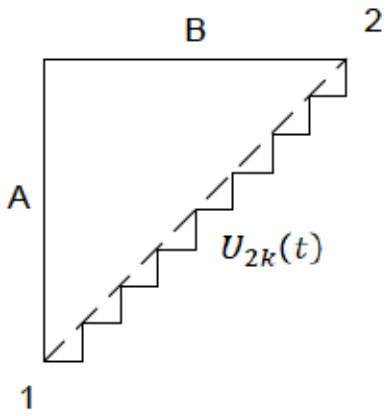



*Рисунок 2 – Принцип действия преобразования Троттера-Сузуки*

**Результаты.** Важным моментом при реализации предложенного ККЧМ является использование квантового преобразования Фурье (QFT). Особенность QFT по сравнению с обычным преобразованием Фурье заключается в том, что оно не позволяет ускорить само преобразование, но дает возможность эффективнее искать начальные приближения для собственных чисел унитарных операторов, которые нужны для других численных методов.

В ортонормированном базисе $|0\rangle, \ldots |N-1\rangle$ QFT представляет собой линейный оператор, действующий следующим образом [17]:

$$|x\rangle \to \frac{1}{\sqrt{N}}\sum_{k=0}^{N-1} e^{-2\pi jkx/N}|k\rangle. \quad (6)$$

Или, если положить $N=2^n$, где $n$ – целое число, и представить состояние $|x\rangle$ двоичным числом $x=x_1x_2\ldots x_n$, (6) можно переписать в более удобной для практических целей форме:

$$|x\rangle = |x_1x_2\ldots x_n\rangle \to$$
$$\frac{(|0\rangle + e^{-2\pi j 0.x_n}|1\rangle)(|0\rangle + e^{-2\pi j 0.x_{n-1}x_n}|1\rangle)\ldots(|0\rangle + e^{-2\pi j 0.x_1x_2\ldots x_n}|1\rangle)}{2^{n/2}}, \quad (7)$$

где запись вида $0.x_1x_2\ldots x_n$ обозначает двоичную дробь $\frac{x_1}{2}+\frac{x_2}{4}+\cdots\frac{x_n}{2^n}$.

Представление (7) позволяет построить простую квантовую схему вычисления QFT на основе квантовых вентилей Адамара *H* и управляемых фазовых сдвигов $R_k=R_\phi$ при $\phi=\pi 2^{(l-k)}$, показанную на рисунке 3.

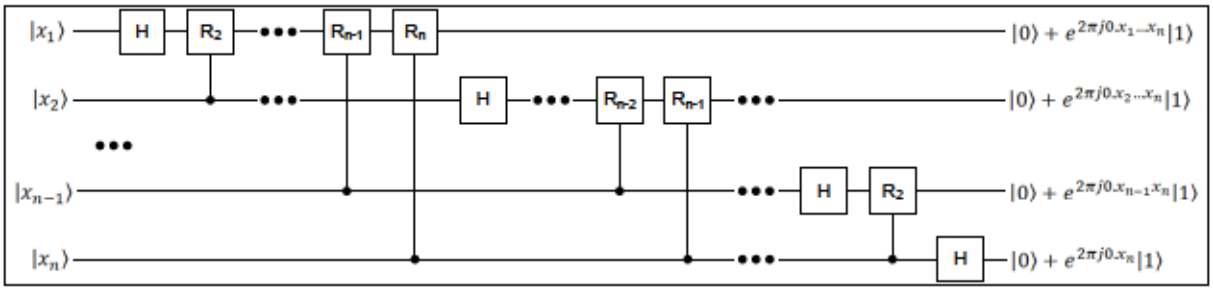



*Рисунок 3 – Квантовая схема вычисления QFT*

**Обсуждение.** С использованием разработанного программного комплекса, реализующего алгоритм предложенного ККЧМ, проведем исследование магнитострикционного сплава Гейслера вида Ni-Mn-Ga, структура кристаллической решетки которого показана на рисунке 4. Гамильтониан УШ (1) для такого сплава, как известно [5], может быть записан в приближении Борна-Оппенгеймера в виде:

$$\hat{H} = \sum_{i=1}^{N}\left[-\frac{\hbar^2}{2m_i}\left(\frac{\partial^2}{\partial x_i^2}+\frac{\partial^2}{\partial y_i^2}+\frac{\partial^2}{\partial z_i^2}\right) - k\frac{Ze^2}{|\vec{r_i}|} + k\sum_{\substack{j=1\\(j>i)}}^{i-1}\frac{e^2}{|\vec{r_i}-\vec{r_j}|}\right], \quad (8)$$

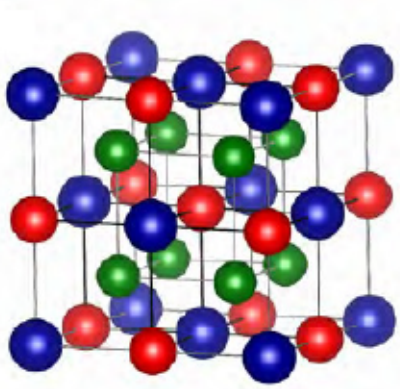
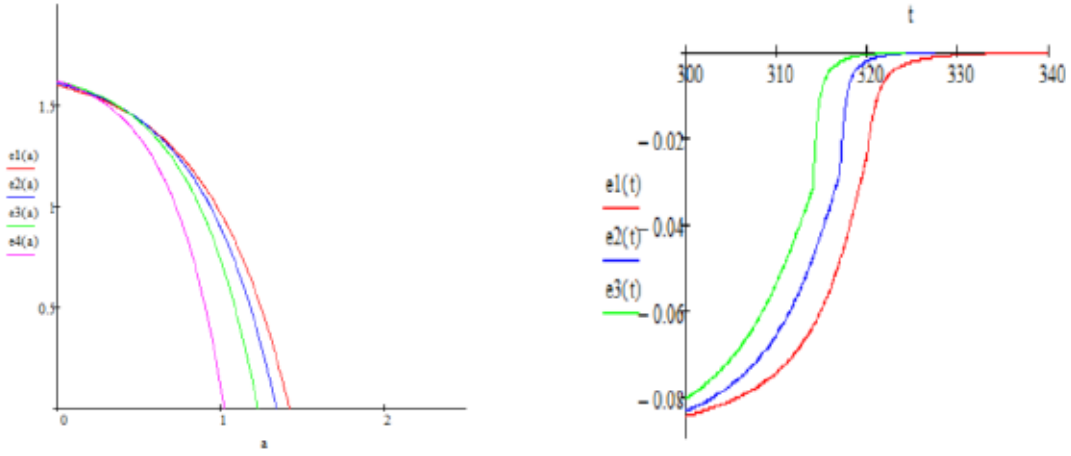


*Рисунок 4 – Ячейка кристаллической решетки сплава вида Ni-Mn-Ga [5]*

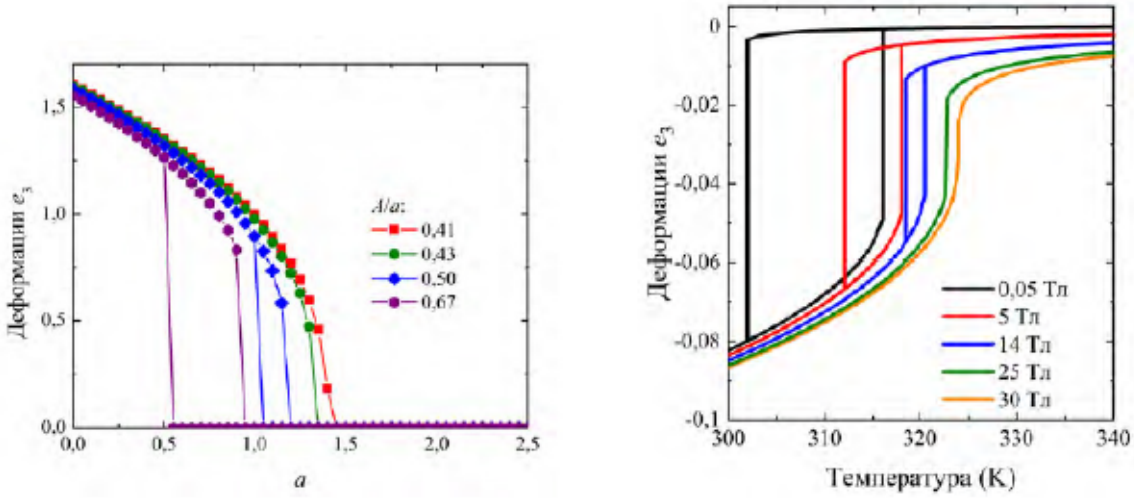
В результате моделирования системы микрочастиц, описываемой гамильтонианом (8), с помощью алгоритма ККЧМ на классической ЭВМ, были получены численные данные ее энергетических характеристик. При исследовании магнитострикционных явлений наибольший интерес представляют значения возможных магнитострикционных деформаций материала в зависимости от его структуры, температуры, наличия внешнего магнитного поля и др. Основываясь на полученных численных данных, были построены графики некоторых из этих зависимостей. На рисунке 5 показаны графики зависимости магнитострикционных деформаций $e_i$ от модуля упругости $a$ (рис. 5а) и температуры $t$ (рис. 5б) при нахождении сплава в магнитных полях разной интенсивности.

Сопоставление графиков на рисунке 5 с известными результатами моделирования сплавов вида Ni-Mn-Ga и экспериментальными данными аналогичных характеристик, приведенных на рисунке 6, показывает отклонения не более 5% при моделировании зависимости деформации от модуля упругости и не более 7% – при построении ее зависимости от температуры. Это свидетельствует о корректности работы алгоритма ККЧМ при исследовании магнитострикционных явлений.




*а)* *б)*

*Рисунок 5 – Графики зависимостей магнитострикционных деформаций сплава Ni-Mn-Ga*




*а)* *б)*

*Рисунок 6 – Экспериментальные характеристики магнитострикционных деформаций сплава Ni-Mn-Ga [5]*

**Выводы.** В статье описаны основные этапы реализации алгоритма ККЧМ, применительно к решению УШ при исследовании физических свойств материалов на квантовом уровне. Применение такого подхода позволяет сочетать основные достоинства классических и квантовых методов.

Предлагаемый алгоритм ККМЧ, основан на использовании модифицированного метода Залки-Визнера, совместно с эмуляцией квантовых преобразований Троттера-Сузуки и QFT, и реализован в составе комбинированной информационной системы. Это позволяет проводить исследования магнитных и механических свойств различных материалов, в том числе и магнитострикционных, на микроуровне с помощью ККЧМ.

В ходе вычислительно эксперимента магнитострикционных явлений в сплавах Гейслера вида Ni-Mn-Ga с помощью разработанной комбинированной информационной системы получены результаты, подтверждаемые известными экспериментальными данными, что дает возможность сделать вывод о корректности работы алгоритма ККЧМ. Таким образом, обозначенную цель работы можно считать достигнутой.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Барабанов А.Л. Квантовая механика. – М.: МФТИ, 2015. – 97 с.
2. Богданов Ю.И. Решение уравнения Шредингера на квантовом компьютере методом Залки–Визнера с учетом квантовых шумов/ Ю.И. Богданов, Н.А. Богданова, Д.В. Фастовец, В.Ф. Лукичев// Письма в ЖЭТФ. – 2021. – т.114(6). – С.391-399.
3. Бормотов А.Н. Исследование математических моделей структурообразования композиционных материалов аналитическими методами/ А.Н. Бормотов, И.А. Прошин, А.В. Васильков// Вестник Брянского государственного технического университета. – 2011. – № 2(30). – С. 62-70. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16388945.
4. Бормотов А.Н. Система управления качеством при математическом моделировании и многокритериальном синтезе наномодифицированных композитов специального назначения/ А.Н. Бормотов, И.А. Прошин, М.В. Кузнецова// Труды Института системного анализа Российской академии наук. – 2014. – т.64. – № 2. – С. 110-118. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21710333.
5. Загребин М.А. Кристаллическая структура, фазовые диаграммы, электронные и магнитные свойства трех-, четырех- и пятикомпонентных сплавов Гейслера: Дис… докт. физ-мат. наук. – Челябинск, 2021. – 326 с.
6. Игнатов С.К. Квантовая химия. Квантовая механика и строение атома. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2015. – 113 с.
7. Кайзер С. Изучаем квантовые вычисления на Python и Q#/ С. Кайзер, К. Гранад. – М.: ДМК Пресс, 2021. – 430 с.
8. Карпухин Э.В. Increasing the Efficiency of Calculation of Magnetic Fields of Magnetostriction Level Gauges, XIV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2021", Lecture Notes in Networks and Systems, 2021, (год публикации – 2021) https://doi.org/10.1007/978-3-030-80946-1_10.
9. Карпухин Э.В. LU-Factorization of the System of Magnetic Field Equations of Magnetostrictive Level Transducers, XIV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2021", Lecture Notes in Networks and Systems, 2021, (год публикации – 2021) https://doi.org/10.1007/978-3-030-80946-1_12.
10. Карпухин Э.В., Бормотов А.Н. Complex of programs for studying magnetic fields of magnetostriction level converters EDP Sciences, E3S Web of Conferences, 2023, 376, 01102 (год публикации – 2023) https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337601102.
11. Карпухин Э.В., Бормотов А.Н. Numerical methods to calculate magnetic fields of magnetostriction level converter EDP Sciences, E3S Web of Conferences, 2023, 376, 01101 (год публикации – 2023) https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337601101.
12. Карпухин Э.В., Бормотов А.Н., Манукян Л. Modeling the Properties of Magnetostrictive Elements Using Quantum Emulators, Computation, 2024, 12, 147 (год публикации – 2024) https://doi.org/10.3390/computation12070147.
13. Кашурников В.А. Вычислительные методы в квантовой физике/ В.А. Кашурников, А.В. Красавин. – М.: МИФИ, 2005. – 412 с.
14. Коновалова И.И. Алгоритм настройки адаптивных регуляторов/ И.И. Коновалова, С.В. Селезнёва, А.Н. Коновалов, А.Н. Бормотов // В мире научных открытий. – 2013. – № 6(42). – С. 22-33. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19049611.
15. Лаптева Т.В. Математические методы исследования нестационарных квантовых систем/ Т.В. Лаптева, М.В. Иванченко, С.В. Денисов. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2016. – 31 с.
16. Линев А.В. Техника решения нестационарного уравнения Шредингера с использованием параллельной версии метода Рунге-Кутта/ А.В. Линев, А.М. Сатанин. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2014. – 89 с.
17. Нильсен М. Квантовые вычисления и квантовая информация/ М. Нильсен, И. Чанг. – М.: Мир, 2006. – 824 с.
18. Ожигов Ю.И. Модифицированная схема Залки–Визнера для моделирования квантовых систем/ Математическое моделирование. – 2012. – Т. 24(2). – С. 109-119.
19. Сатанин А.М. Дополнительные главы квантовой механики: методы решения задачи рассеяния с использованием высокопроизводительных вычислений. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2014. – 56 с.
20. Серов В.В. Численные методы решения квантово-механических задач. – Саратов: Саратовский государственный университет, 2008. – 39 с.
21. Чулуунбаатар О. Многослойные схемы для численного решения нестационарного уравнения Шрёдингера методом конечных элементов/ Вестник РУДН, Серия Математика. Информатика. Физика. – 2008. – №. 3. – С. 68-83.

***Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-29-00207), https://rscf.ru/project/23-29-00207/.***

*Статья поступила в редакцию 19.09.2024*
*Статья принята к публикации 13.12.2024*

УДК 004.032.2
EDN: RMFNZX

# СЕГМЕНТАЦИЯ ЦВЕТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЯБЛОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ НЕЧЕТКОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ

© Автор(ы) 2024

SPIN: 2852-2633
AuthorID: 185018
ORCID: 0000-0003-3313-2731

**ГРОМОВ Юрий Юрьевич**, доктор технических наук, профессор,
директор института автоматики и информационных технологий
*Тамбовский государственный технический университет*
*(392024, Россия, Тамбов, улица Советская, 116, e-mail: gromovtambov@yandex.ru)*

SPIN: 5033-6943
AuthorID: 865469
ORCID: 0009-0009-3628-6980

**КАРАСЕВ Павел Игоревич,** кандидат технических наук, доцент кафедры КБ-1 «Защита информации»
*МИРЭА - Российский технологический университет*
*(107076, Россия, Москва, улица Стромынка, 20, e-mail: karasev@mirea.ru)*

**ШАМСУЛДИН Хайдар Абдулваххаб Х.**, аспирант
*Тамбовский государственный технический университет*
*(392024, Россия, Тамбов, улица Советская, 116, e-mail:* shamsuldaeenhaidar@mail.ru*)*

**МУСТАФА Абдулкадим Аль-Амиди Дхаир**, аспирант
*Тамбовский государственный технический университет*
*(392024, Россия, Тамбов, улица Советская, 116, e-mail:* ameedeemustafa@mail.ru*)*

**Аннотация.** В этой статье исследуется одно из известных приложений обработки изображений, которое представляет собой классификацию овощей и фруктов на основе их качества с использованием цветных изображений. Для сегментации цветных изображений яблока активным контурным методом выполняется предварительная обработка, что привело к увеличению точности метода сегментации. Метод нечеткой кластеризации – метод обучения без учителя, который используется для сегментации цветных изображений яблок. Следует отметить, что вариации яркости *i(x, y)* приводят к созданию неоднородности в цветных изображениях. Показано, что можно было бы устранить большую часть этой неоднородности яркости. Соответственно, в новых полученных снимках контуры проявились качественно и, наоборот, устранены дефекты тени и яркости в большинстве областей изображения. Показано, что предлагаемый метод может быть предпочтительнее по сравнению с другими стандартными методами из-за его большей эффективности, чем стандартные Методы нечеткой кластеризации.

**Ключевые слова:** нечеткие *C*-средние, сегментация изображений цветного яблока, активная контурная модель.

# SEGMENTATION OF COLORED APPLE IMAGES USING FUZZY CLUSTERING METHODS

© The Author(s) 2024

**GROMOV Yuri Yurievich**, doctor of technical sciences,
director of the Institute of Automation and Information Security
*Tambov State Technical University*
*(392024, Russia, Tambov, Sovetskaya Street, 116, e-mail: gromovtambov@yandex.ru)*

**KARASEV Pavel Igorevich,** candidate of technical sciences, associate professor,
lecturer of the KB-1 "Information Protection" Department
*MIREA - Russian Technological University*
*(107076, Russia, Moscow, Stromynka Street, 20, e-mail: karasev@mirea.ru)*

**SHAMSULDAEEN Haidar Abdulwahhab H.**, graduate student
*Tambov State Technical University*
*(392024, Russia, Tambov, Sovetskaya Street, 116, e-mail: shamsuldaeenhaidar@mail.ru)*

**MUSTAFA Abdulkadhim Al-Ameedee Dhahir**, graduate student
*Tambov State Technical University*
*(392024, Russia, Tambov, Sovetskaya Street, 116, e-mail: ameedeemustafa@mail.ru)*

**Abstract.** This article examines a widely used application of image processing, specifically the classification of fruits and vegetables based on their quality using color images. The preprocessing step involves segmenting colored apple images using the active contour technique, which significantly enhances the accuracy of the segmentation. The fuzzy clustering method, an unsupervised learning technique, is employed for segmenting these colored apple images. It is important to note that variations in brightness *(i(x, y))* introduce heterogeneity in the color images. The study

demonstrates that much of this brightness variation can be eliminated. As a result, the contours in the processed images are more distinct, and issues related to shadow and brightness inconsistencies across most of the image are removed. Our findings suggest that the proposed method offers superior efficiency compared to traditional fuzzy clustering methods.

**Keywords:** fuzzy *C*-means, segmentation of colored apple images, active contour model.

*Для цитирования: Громов Ю.Ю. Сегментация цветных изображений яблок с использованием методов нечеткой кластеризации / Ю.Ю. Громов, П.И. Карасев, Х.А.Х. Шамсулдин, А.А.-А.Д. Мустафа // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 4(68). – С. 35-40. – EDN: RMFNZX.*

**Введение.** Одним из первых плодов, которые культивировали и использовали древние люди, было яблоко. Это один из наиболее широко культивируемых древесных плодов и наиболее известный из многих представителей рода Malus, которые используются людьми. Кроме того, это отряд цветковых растений или Розалес. Производство фруктов высокого качества и хорошее представление товара на рынке – важные цели для каждого производителя. При увеличении возможности выбора продуктов на мировых рынках, все производители заботятся о том, чтобы представлять на рынке фрукты высокого качества. С другой стороны, производители, которые не смогут удовлетворить внимание потребителя, столкнутся с большими экономическими проблемами. Следовательно, чтобы избежать экономических проблем, качество фруктов должно учитываться во всех производственных процессах, при транспортировке и на хранении. Хорошо известно, что основными конкурентами РФ по производству фруктов являются США, западноевропейские страны, Канада, Япония и Аргентина. Чтобы сохранить позицию РФ на мировых рынках фруктов, необходимо учитывать некоторые важные факторы, такие как: улучшение количества, качества продукции и экспорт продуктов в соответствующем качестве. В этом случае, если процедура отбраковки выполняется работниками и вручную, проявляются некоторые важные недостатки: 1) потеря времени, 2) отсутствие повторяемости, 3) зависимость от работников, 4) дорогая стоимость. Эти трудности можно разрешить с помощью проектирования и разработки метода для использования в процессе отбраковки. Этот метод дает некоторые преимущества, такие как выполнение процесса отбраковки без потери времени, а также отсутствие необходимости в чьем-либо присутствии. Следует отметить, что большая часть витаминов яблока находится вблизи его внешней поверхности (кожуры). Соответственно, из-за важности кожуры яблока эта часть должна быть здоровой и без дефектов. Поэтому в этой работе исследуются и обрабатываются цветные изображения яблока с помощью предложенного метода, который позволяет разделять его участки на две группы: группа здоровых участков и группа дефектных участков. Методы сегментации изображений основаны на признаках: неоднородности и сходстве интенсивности яркости [1-3]. Для изучения методов сегментации изображений для определения качества сельскохозяйственной продукции будет рассмотрено четыре важных подхода к процессу сегментации, поскольку сегментация может основываться на: 1) пороговом уровне, 2) регионе, 3) градиенте и 4) модели разделения. В представленных решениях некоторые из методов напрямую используют метод порогового значения, а некоторые другие методы дополняют этот подход элементами других методов. Сегментация будет работать должным образом, если исследуемые данные имеют равномерный уровень серого цвета [4]. До этого другими группами ученых была предложена структурированная система оценки качества яблок. Используя диагностику второго порядка, им удалось точно классифицировать здоровые плоды с точностью 73% [5-6]. Другая группа исследователей применила эту систему для разделения на сегменты яблок. Точность сегментации изображения кожуры составила 79% благодаря учёту трёх ключевых характеристик входных данных: средней интенсивности яркости плодов на исходном изображении и 10-й гармоники дискретного косинусного преобразования [7-8]. Также учёные разработали и изучили быстрый метод *FCM* для дискретизации изображений фруктов. Он основан на объединении информации о локальных пятнах и оттенках серого [9-11].

**Методология.** На рисунке 1 показана основная структура представленного метода сегментации цветных изображений яблока. Как известно, для сегментации изображения яблока предварительная сегментация изображения была выполнена с помощью метода активного контура. Соответственно, этот активный контур используется для устранения фонового изображения яблока, что продемонстрировало более высокую точность по сравнению с другими методами сегментации. Кроме того, для сегментации цветных изображений яблока используется метод нечеткой кластеризации. На цветных изображениях можно наблюдать изменения интенсивности яркости, которые оказывают значительное влияние на конечные результаты. Таким образом, представленный метод, включающий усовершенствованный метод изменения интенсивности света, позволил скорректировать неоднородность цветовых изображений. Необходимо использовать определенное свойство при сегментации изображения яблока на две части: 1) здоровая часть и 2) дефектная часть. Кроме того, это свойство можно использовать для классификации цветных изображений. Поэтому в предлагаемой структуре необходимо использовать процесс предварительной

обработки.

В этом подразделе будет описано некоторые методы, основанные на активном контуре. Кроме того, эти методы или алгоритм работают на основе моделей изменчивости. Модель изменчивости работает в следующей процедуре: выбор и создание соответствующей математической модели из контура в пространстве данных и, наконец, конфигурация этой модели изменяется в соответствии с краями желаемого объекта. Чтобы полностью выделить пятно на яблоке в цветных изображениях, необходимо перенести цветные изображения из области *RGB* в область *La*b** [9]. Чтобы устранить искомый фон, используется *a** из-за его тонкой дискриминантной характеристики при разделении фрукта и фона, и все данные о цвете сохраняются.

Рисунок 2 иллюстрирует реальное изображение яблока и устраняет фон с помощью модели контура.

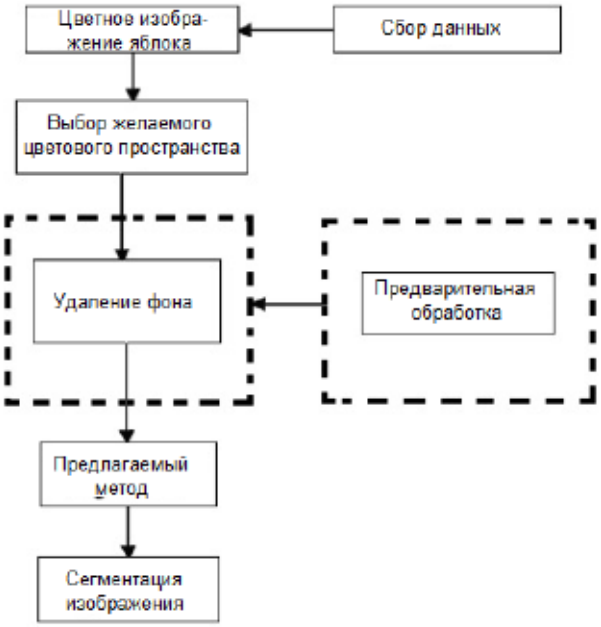



*Рисунок 1 – Структура предложенного метода*

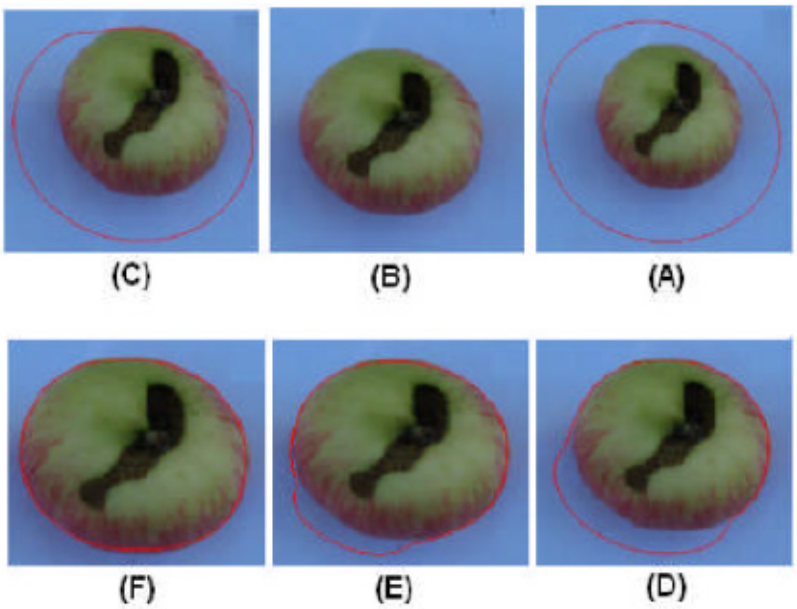



*Рисунок 2 – Минимизация энергии модели активного контура на цветных изображениях плодов яблони: A) Основное изображение, B-F) различные этапы минимизации энергии*

*Стандартный метод нечеткой кластеризации.* Метод *FCM* был представлен Бездеком [12]. Эта модель является улучшенной моделью метода *K*-средних. Метод *FCM* устанавливает функцию принадлежности для данных, и аналогичные данные классифицируются в определенном классе. Показано, что метод является итерационным процессом оптимизации для достижения минимальной целевой

функции и может быть представлен уравнением. 1:

$$J(u,v)=\sum_{i=1}^{c}\sum_{k=1}^{n}m_{ik}^{f}d_{ik}^{2} \quad (1)$$

Данное уравнение обеспечивает следующее:

$$\sum_{i=1}^{c}m_{ik}=1 \quad m_{ik}\in[0,1],\ 1\le k\le n,\quad 1\le i\le c \quad (2)$$

$$d_{ik}^{2}=\|x_k-v_i\| \quad (3)$$

где $n$ – количество векторов признаков (количество пикселей в изображении), а $c$ определяет количество классов, $m_{ik}$ это принадлежность пикселя $i$-му классу, а $v_i$ – центр $i$-го кластера, $f$ – постоянная величина, которая контролирует результаты нечеткого зонирования. В этой работе $f$ установлено равным 2 ($f = 2$). Наконец, $d$ – это межцентровое расстояние $x_k$ пикселей, а также показывает центр класса $v_i$.

*Предлагаемый метод с изменением яркости цветного изображения.* Очевидно, что изменение яркости $i(x,y)$ приводит к появлению неоднородностей на цветных изображениях, которые можно устранить. Изменения яркости появляются на всех изображениях в качестве коэффициента умножения, который наблюдается и на МРТ-изображениях. Необходимо найти, а затем устранить эти изменения, чтобы получить приемлемое и подходящее изображение для сегментации. В результате этой процедуры на новых изображениях границы стали очевидными, а также исчезли тени и изменение яркости в различных областях яблока.

Использование параметра изменения яркости поможет оптимизировать целевую функцию в стандартном методе *FCM*. Пересмотренная и новая целевая функция – это $J(U,V,\beta)$, минимизация которой приводит к оптимизированной сегментации.

$$J(U,V,\beta)=\sum_{i=1}^{c}\sum_{k=1}^{n}u_{ik}^{m}\left\|y_k-\omega_k\beta_k-v_i\right\|^2+\tilde{x}\left(1+\sum_{i=1}^{c}u_{ik}^{m}\right) \quad (4)$$

$$\tilde{x}=\frac{\sum_k y_k}{n}$$

Происходит переход к производной целевой функции по $u_{ik}$, $v_i$ и $\beta_k$, чтобы минимизировать ее. Этот метод приводит к получению следующих матриц: $u_{ik}$* (нечеткая матрица степеней принадлежности), $v_i$* (матрица центров кластеров) и $\beta_k$* (матрица вариаций яркости) [11].

$$\beta_k^{*}=\frac{1}{\omega_k}\left(y_k-\frac{\sum_{i=1}^{c}u_{ik}^{m}v_i}{\sum_{i=1}^{c}u_{ik}^{m}}\right) \quad (5)$$

Достигнутый результат является подходящей оценкой вариаций яркости. В уравнении 7 $\omega_k$ – коэффициенты вариаций яркости, которые определяются в необязательном стиле. Кроме того, матрица кластерных центров приобретает вид:

$$v_i^{*}=\frac{\sum_{k=1}^{c}u_{ik}^{m}(y_k-\omega_k\beta_k)}{\sum_{k=1}^{c}u_{ik}^{m}} \quad (6)$$

На заключительном этапе, чтобы минимизировать целевую функцию в направлении $u_{ik}$, а также учитывая, что $\sum_{i=1}^{c}u_{ik}=1$, имеем:

$$u_{ik}^{*}\sum_{j=1}^{c}\left(\frac{\left\|y_k-\omega_k\beta_k-v_i\right\|^2+\tilde{x}}{\left\|y_k-\omega_k\beta_k-v_j\right\|^2+\tilde{x}}\right)^{\frac{1}{m-1}}\Bigg)^{-1} \quad (7)$$

Это уравнение используется для вычисления значения нечеткой принадлежности данных в узком значении этого понятия. Если $c$ – количество кластеров, а $m$ установлено равным 2 ($m = 2$), возможно сократить данный метод следующим образом:

1) 1-й шаг: на этом шаге необходимо выбрать количество кластеров, а затем инициализировать центры кластеров.

2) 2-й шаг: с учетом уравнения 9 получается нечеткое значение принадлежности.

3) 3-й шаг: необходимо использовать уравнение 8, центры кластеров могут быть обновлены.

4) 4-й шаг: используя уравнение 7, можно обновить изменения яркости.

5) 5-й шаг: повторить шаги 2-4, пока не будет достигнут окончательный результат.

Учитывая значение принадлежности на каждом шаге, когда полученное значение меньше $\varepsilon$, поиск решения завершается.

**Результаты.** Результаты стандартных методов *FCM* и предложенного метода цветного изображения яблока.

Используя модель активного контура и извлечение фрукта из фона, можно было бы применить стандартные нечеткие методы, а также предложенную модель на данных. Эти методы реализованы на изображении фрукта, и из-за одноцветности фона его влияние незначительно. На рисунках 3 и 4 представлены результаты стандартной сегментации *FCM*, а также предложенный метод для некоторых образцов цветных изображений яблока. На этих рисунках отображена исходная версия изображения, использованного для представленного метода, и последующие изображения, полученные после запуска программы активного контура и отделения фрукта от фона.

Точность сегментации определяется различными методами и уровнями. Самый низкий уровень – один пиксель, напротив, в большинстве приложений оценка основана на высоком уровне. Для сегментации и выявления дефектов низкие уровни могут быть оценены на основе наличия неисправного пикселя. «*TP*» – количество дефектных пикселей, которые правильно диагностированы. «*FP*» – количество здоровых пикселей, которые диагностируются как дефектные пиксели. «*TM*» количество здоровых пикселей, которые правильно диагностированы. «*FN*» – количество дефектных пикселей, которые обнаруживаются как обычные пиксели. Для оценки эффективности сегментации используются следующие критерии, (подробно будут разобраны

$M_2$, $M_3$, $M_6$, $M_7$) : $M_1$: Этот параметр показывает разницу между теоретическими и практическими результатами размера дефекта, $M_2$: Этот критерий показывает ошибку распознавания по сравнению с теоретическим и практическим результатом с использованием стиля пиксель к пикселю.

$$M_2 = \frac{FP + FN}{TP + FP + TN + FN} \quad (8)$$

$M_5$: Этот критерий показывает уровень правильной идентификации дефектного класса пикселей. Таким образом, этот критерий был сосредоточен на дефектных частях поверхности плода.

$$M_5 = \frac{TP}{TP + FN} \quad (9)$$

$M_6$: Этот параметр демонстрирует уровень правильной идентификации здорового класса пикселей. Таким образом, этот критерий был сосредоточен на здоровой части поверхности плода.

$$M_6 = \frac{TN}{TN + FP} \quad (10)$$

$M_7$: Этот критерий демонстрирует соотношение диагностирования как здоровых, так и дефектных пикселей

$$M_7 = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN} \quad (11)$$

Соответствующая классификация должна иметь более низкие значения для $M_1$, $M_2$ и $M_3$ и более высокие значения для $M_4$, $M_5$, $M_6$ и $M_7$. Для каждого цветного изображения рассчитываются все эти критерии и, наконец, определяются средние значения их для всех изображений.

На рисунке 5 проиллюстрированы окончательные результаты сегментации цветного изображения яблока стандартным методом *FCM* и предложенным методом, основанном на критериях $M_1$, $M_2$ и $M_3$.

На рисунке 6 показаны результаты сегментации стандартным методом *FCM* и предложенным методом, основанном на критериях $M_4$, $M_5$, $M_6$ и $M_7$.

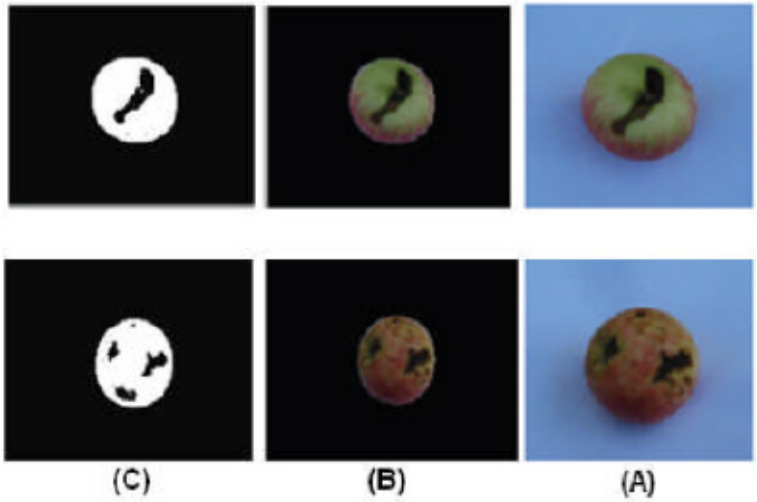



*Рисунок 3 – Результаты сегментации стандартным методом FCM цветных изображений яблока: A) основное изображение, B) устранение фона с использованием метода активного контура и C) сегментация стандартным методом FCM*

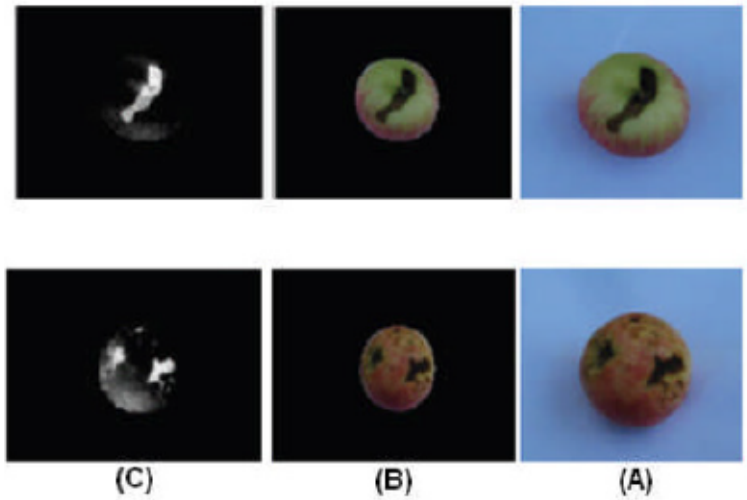



*Рисунок 4 – Результаты предложенного метода сегментации цветных изображений яблока: A) основное изображение, B) устранение фона с использованием метода активного контура и C) сегментация предложенным методом и коррекция изменений яркости*

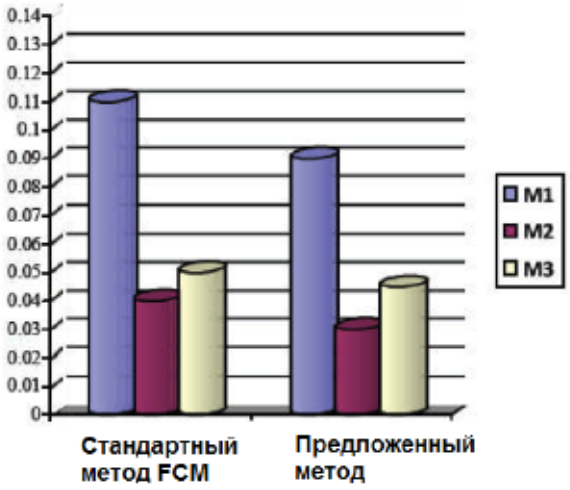



*Рисунок 5 – Результаты предложенного метода сегментации цветных изображений Яблока на основе критериев $M_1$, $M_2$ и $M_3$*

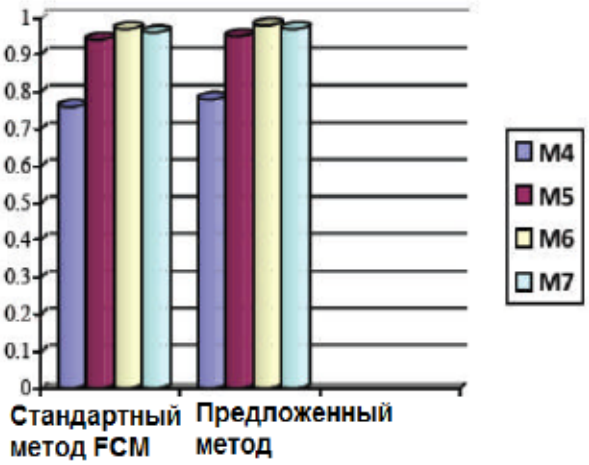



*Рисунок 6 – результаты предложенного метода сегментации цветных изображений Яблока на основе критериев $M_4$, $M_5$, $M_6$ и $M_7$*

**Обсуждение.** В вопросе сегментации изображений было показано, что одним из фундаментальных шагов в этом случае является извлечение свойств. Рассмотрение цветного пространства с меньшими размерами, с более высоким разрешением и низкой вычислительной сложностью является идеальным этапом в этой теме научного исследования. Таким образом, использование свойств множества цветов, ткани и геометрической формы плодов оказывает заметное влияние на сегментацию цветного изображения на здоровые и дефектные классы.

**Выводы.** Для исследования качества сельскохозяйственной продукции необходимо использовать безотказную работу. Принципиальное отличие исследуемого метода от стандартного заключается в том, что представленный метод учитывает созданный коэффициент вариаций яркости и корректирует его. Цветовое пространство *La*b** обеспечивает лучшее свойство сегментации изображений цвета яблока. Таким образом, предложенный метод показывает лучшую производительность по сравнению со стандартным методом.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Венцов, Н.Н. Обзор алгоритмов кластеризации, используемых в задачах поиска изображений по содержанию / Н.Н. Венцов, В.В. Долгов, Л.А. Подколзина // Инженерный вестник Дона. – 2016. – № 3(42). – С. 35. – EDN YGSSQH.
2. Chatzichristofis S.A. et al. FCTH: A NOVEL LOW-LEVEL DESCRIPTOR FOR IMAGE RETRIEVAL // IEEE Transactions on Image Processing. – 2019. – Vol. 28. – №12.
3. Liu Y. et al. Image Retrieval Using Fuzzy Systems and Wavelet Transform // Journal of Intelligent Information Systems. – 2020. – Vol. 56. – №2.
4. Mozhzhukhina A.V. LSI ELEMENT PLACEMENT METHOD BASED ON DEEP REINFORCEMENT LEARNING // International journal of professional science. – 2022. – №2.
5. J. Li, et al. Image Classification and Retrieval Using Composite Region Templates // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2000.
6. J. Z. Wang, et al. Content-Based Image Indexing and Searching Using Daubechies' Wavelets // IEEE Transactions on Image Processing. – 2001.
7. J. Liu, et al. Color Texture Histogram (CTH) for Image Retrieval // IEEE Transactions on Image Processing. – 2013.
8. Wang X. et al. Image Retrieval Using Manifold Ranking and Edge Information // IEEE Transactions on Image Processing. – 2019. – Vol. 28.
9. Xu X. et al. Efficient Edge-preserving Manifold Ranking for Large-scale Image Retrieval // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. – 2020. – Vol. 31. – No. 1.
10. A.W.M. Smeulders, et al. Content-Based Image Retrieval at the End of the Early Years // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2000. – Vol. 22. – No. 12.
11. M.A. Hearst, et al. Search Engines: Information Retrieval in Practice // Cambridge University Press. 2009. Chapter 4: Indexing and Retrieval.
12. Александров В.А., Кобрин А.И. Коллективный алгоритм выделения операционных подпространств для группы роботов при решении задачи покрытия территории // Известия вузов. Машиностроение. – 2011. – №9.

*Статья поступила в редакцию 24.10.2024*
*Статья принята к публикации 13.12.2024*

УДК 330.32:658.4
EDN: SONBSR

# ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ КАПИТАЛА: СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ

© Автор(ы) 2024

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

**ПАЩЕНКО Татьяна Юрьевна,** кандидат экономических наук, доцент,
доцент кафедры «Экономика и финансы»
*Пензенский государственный университет*
*(440026, Россия, Пенза, улица Красная, 40, e-mail: tania.pashchenko@gmail.com)*

**МИНЮШИНА Елена Сергеевна,** студентка кафедры «Экономика и финансы»
*Пензенский государственный университет*
*(440026, Россия, Пенза, улица Красная, 40, e-mail: lena.minyushina@mail.ru)*

**КОЛГАНОВА Яна Алексеевна,** студентка кафедры «Экономика и финансы»
*Пензенский государственный университет*
*(440026, Россия, Пенза, улица Красная, 40, e-mail: yanakolganova2003@gmail.com)*

**Аннотация.** В настоящее время под движением (миграцией) капитала понимается не только перемещение капитала из одной страны в другую (международное движение капитала), но и перемещение капитала внутри страны (внутреннее перемещение). Целью движения капитала является получение более высокой нормы прибыли. Международное движение капитала (трансграничное движение капитала, экспорт и импорт капитала, вывоз и ввоз капитала, отток и приток капитала) – это форма международных экономических отношений, сопоставимая по объемам с внешней торговлей. Внутренняя миграция капитала представляет собой приливы и отливы капитала из одних отраслей национальной экономики и регионов в другие. Считается, что внутренняя миграция приводит к выравниванию нормы прибыли на вложенный капитал в различных отраслях народного хозяйства. Данный анализ имеет большое практическое значение, так как позволяет выявить реальные и потенциальные риски, оценить дополнительные возможности развития. В статье проведен анализ динамики прямых иностранных инвестиций России (входящих и исходящих), а также распределения их по федеральным округам и регионам. Выполнен анализ распределения инвестиций в основные средства в разрезе федеральных округов и субъектов РФ. По результатам проведенного анализа выявлены основные тенденции в этой сфере.

**Ключевые слова:** движение капитала, современные тенденции, приток и отток капитала, бегство капитала, финансы, финансовые ресурсы, прямые иностранные инвестиции, инвестиционный климат, инвестиционные риски, инвестиционные рейтинги.

# THE FEATURES OF CAPITAL MOVEMENT: CURRENT TRENDS

© The Author(s) 2024

**PASHCHENKO Tatiana Yuryevna,** candidate of sciences in Economics, associate professor,
associate professor of the department «Economy and finance»
*Penza State University*
*(440026, Russia, Penza, Krasnaya Street, 40, e-mail: tania.pashchenko@gmail.com)*

**MINYUSHINA Elena Sergeevna,** student of the department «Economy and finance»
*Penza State University*
*(440026, Russia, Penza, Krasnaya Street, 40, e-mail: lena.minyushina@mail.ru)*

**KOLGANOVA Yana Alekseevna,** student of the department «Economy and finance»
*Penza State University*
*(440026, Russia, Penza, Krasnaya Street, 40, e-mail: yanakolganova2003@gmail.com)*

**Abstract.** Currently, the movement (migration) of capital is understood not only as the movement of capital from one country to another (international capital movement), but also the movement of capital within the country (internal movement). The scale, geography and statistics of such movement, as well as its prerequisites, motives, determinants and consequences are of great interest to researchers. These issues are closely related to scientific and practical tasks in risk analysis and assessment, since capital movement entails both potential opportunities and potential threats. Domestic and foreign scientists have developed theories of international capital movement, leading rating agencies regularly compile investment ratings of countries, regions and large companies. All this is explained by the relevance and great practical significance of this topic. The main objective of the article is to analyze modern trends in the field of capital movement, both international and domestic. This analysis is of great practical importance, as it allows identifying real and potential risks, assessing additional development opportunities. The article analyzes the dynamics of foreign direct investment in Russia (incoming and outgoing), as well as their distribution by federal districts and regions. An analysis of the distribution of investments in fixed assets by federal districts and subjects of the Russian Federation was carried

out. Based on the results of the analysis, the main trends in this area were identified.

**Keywords:** capital movement, current trends, capital inflow and outflow, capital flight, finance, financial resources, foreign direct investment, investment climate, investment risks, investment ratings.

*Для цитирования: Пащенко Т.Ю. Особенности движения капитала: современные тенденции / Т.Ю. Пащенко, Е.С. Минюшина, Я.А. Колганова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 4(68). – С. 41-45. – EDN: SONBSR.*

**Введение.** Огромный интерес у исследователей вызывают масштабы, география и статистика перемещения капитала, а также его предпосылки, мотивы, детерминанты и последствия. Данные вопросы тесно связаны с научными и практическими задачами по анализу и оценке рисков, так как движение капитала влечет за собой как потенциальные возможности, так и потенциальные угрозы. Отечественными и зарубежными учеными разработаны теории международного движения капитала, ведущими рейтинговыми агентствами регулярно составляются инвестиционные рейтинги стран, регионов и крупных компаний. Все это объясняется актуальностью и большой практической значимостью данной темы. Основной целью статьи является анализ современных тенденций в сфере движения капитала, как международного, так и внутреннего. В рамках международного движения капитала большую роль играют прямые иностранные инвестиции (ПИИ, *foreign direct investment, FDI*). В целом движение капитала несет в себе как потенциальные возможности, так и потенциальные риски. Например, такое явление, как «бегство капитала», может привести к серьезным негативным последствиям.

**Методология.** Проблеме движения (миграции) капитала посвятили свои работы многие отечественные и зарубежные ученые: Булатов А.С. [1, 12, 15], Головнин М.Ю., Никитина С.А. [2], Головнин М.Ю. [3], Гурова И.П. [4], Дементьев М.П. [5], Ельшин Л.А. [6], Ерошкин А.М., Петров М.В. [7], Котова И.Б., Золотова А.И., Агапова А.В. [8], Кузнецов В.А., Фалина Н.В. [9], Марковская Е.И. [10, 11], Петренко И.А. [13], Сулейманов М.Д., Михин А.А. [16], Табакова А.С. [17, 18], Шевченко И.В., Третьякова М.К. [19], Шмелева Е.С., Ромашова И.А., Синева Н.Л., Яшкова Е.В. [20], Щербаков В., Терещенко Д. [21], Юзеева В.В. [22] и др. В то же время многие вопросы в сфере движения капитала недостаточно изучены, поэтому рассматриваемая тема является актуальной и имеет большую практическую значимость. Цель работы – анализ современных тенденций в сфере движения капитала, как международного, так и внутри страны.

При анализе динамики прямых иностранных инвестиций России и их распределения по федеральным округам и регионам была использована методология Банка России [24]. При анализе распределения инвестиций в основные средства в разрезе федеральных округов и субъектов РФ использовалась методология Росстата [14].

**Результаты.** Согласно результатам проведенного анализа поступление иностранных инвестиций в российскую экономику за последние два года значительно сократилось, в то время как их изъятие увеличилось. Прямые инвестиции уменьшились в результате снижения объемов участия резидентов в иностранных компаниях, в том числе вследствие прочих изменений, связанных с переходом участников внешнеэкономической деятельности в российскую юрисдикцию. Прямые инвестиции в экономику Российской Федерации снизились как из-за выхода нерезидентов из капиталов российских компаний, так и из-за перехода участников внешнеэкономической деятельности в российскую юрисдикцию [24]. На рисунке 1 представлена динамика сальдо прямых иностранных инвестиций (ПИИ, *foreign direct investment, FDI*) России (входящих и исходящих) за 1990-2023 годы, а на рисунке 2 – распределение прямых иностранных инвестиций (ПИИ, *foreign direct investment, FDI*) по федеральным округам.

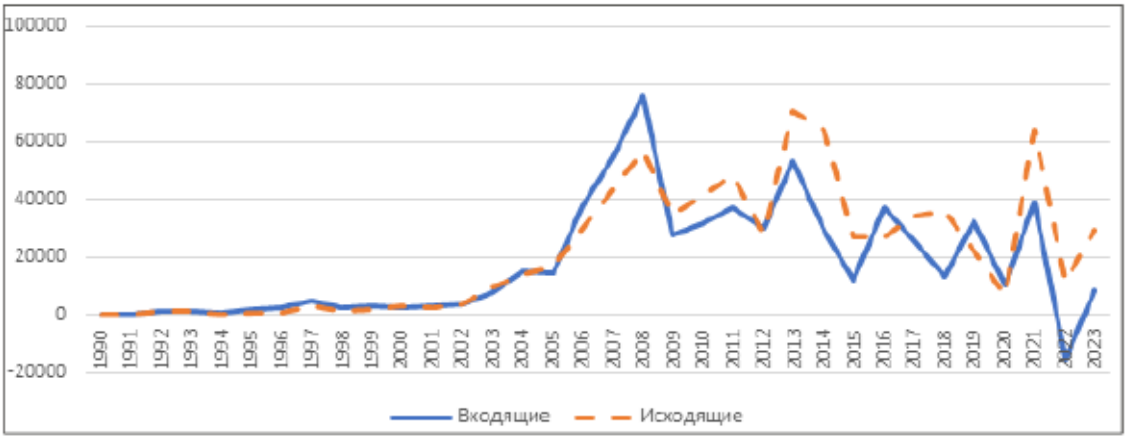



*Рисунок 1 – Динамика сальдо прямых иностранных инвестиций (ПИИ, foreign direct investment, FDI) России, млн. долл. США [24]*

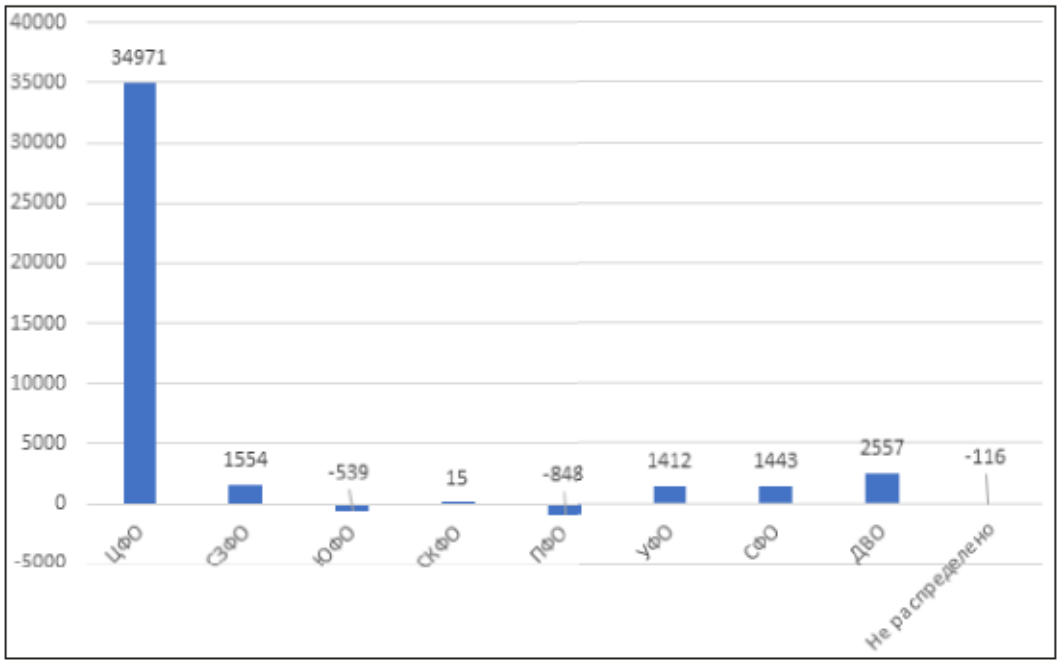



*Рисунок 2 – Распределение прямых иностранных инвестиций (ПИИ, foreign direct investment, FDI) по федеральным округам, млн. долл. США [24]*

Сокращения, использованные на рисунке 2 и далее в статье: ЦФО – Центральный федеральный округ, СЗФО – Северо-Западный федеральный округ, ЮФО – Южный федеральный округ, СКФО – Северо-Кавказский феде-ральный округ, ПФО – Приволжский федеральный округ, УФО – Уральский федеральный округ, СФО – Сибирский федеральный округ, ДВО – Дальневосточный федеральный округ.

В результате проведенного анализа было выявлено, что у Центрального федерального округа наибольшая доля *FDI* (86,5%) приходится на, а внутри него – 91,8% приходится на Москву. О высокой концентрации размещения прямых иностранных инвестиций свидетельствует и анализ их размещения в разрезе регионов. Распределение прямых иностранных инвестиций (ПИИ, *foreign direct investment, FDI*) по регионам РФ представлено на рисунке 3.

Из рисунка 3 видно, что примерно 79% всех ПИИ инвестиций приходится на Москву. Далее с большим отрывом идет Кемеровская область (примерно 4% ПИИ), затем Челябинская, Тюменская, Сахалинская области (на долю каждой из которых приходится около 3% ПИИ). На долю всех остальных регионов приходятся оставшиеся 5% ПИИ. Немного другая картина наблюдается при анализе концентрации размещения инвестиций в основные средства

На рисунке 4 представлено распределение инвестиций в основные средства в разрезе федеральных округов, а на рисунке 5 – в разрезе субъектов РФ.

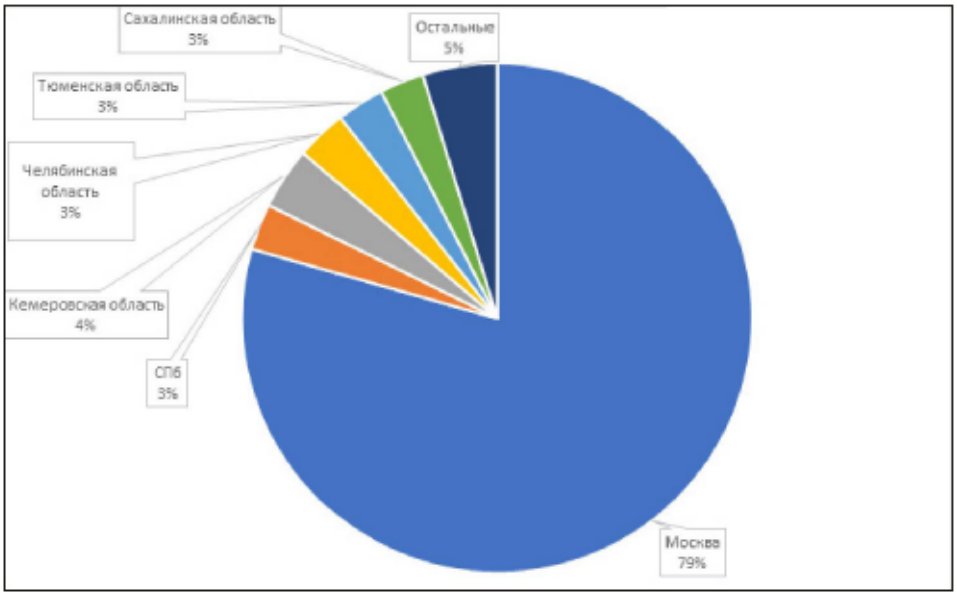



*Рисунок 3 – Распределение прямых иностранных инвестиций (ПИИ, foreign direct investment, FDI) по регионам РФ [24]*

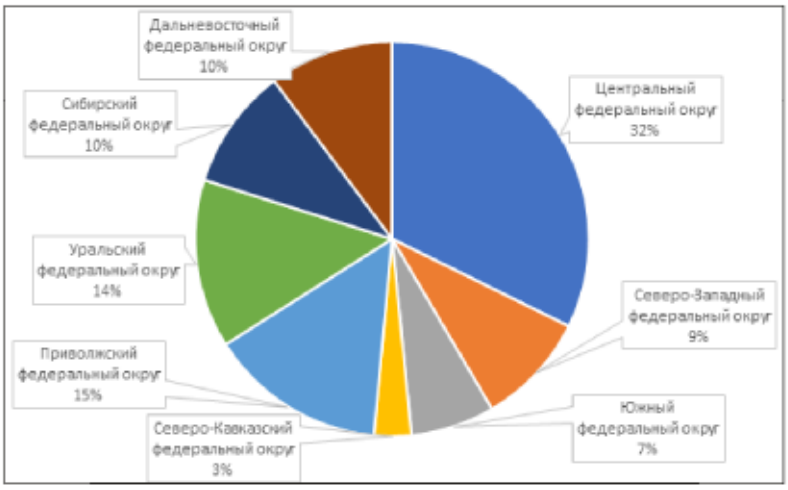



*Рисунок 4 – Распределение инвестиций в основные средства по федеральным округам в 2023 году [14]*

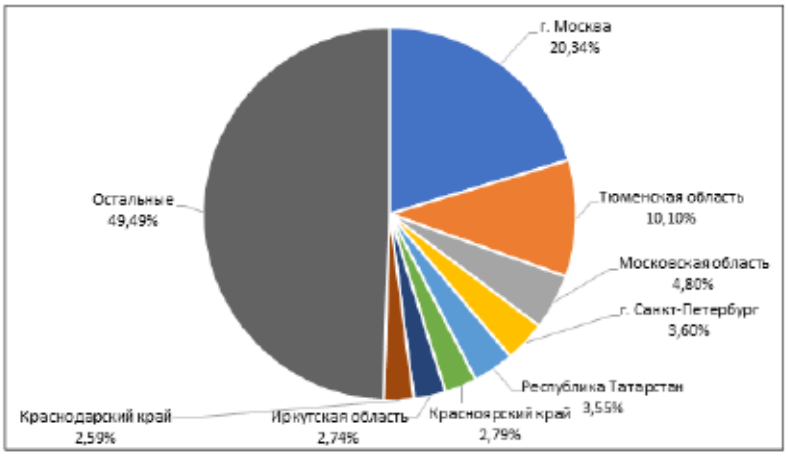



*Рисунок 5 – Распределение инвестиций в основные средства по регионам РФ в 2023 году [14]*

Инвестиции в основные средства распределены неравномерно. Так, например, 32 % таких инвестиций в 2023 году приходилась на Центральный федеральный округ, остальные федеральные округа следуют за ним с достаточно большим отрывом. Если анализировать распределение в разрезе субъектов РФ, то на долю Москвы приходится 20,34%. А суммарно на долю Москвы и еще семи субъектов РФ приходится примерно половина инвестиций в основные средства. На долю всех остальных регионов приходятся оставшиеся 49,49 %. Это свидетельствует о разной инвестиционной привлекательности регионов.

Что касается темпов прироста инвестиций в основной капитал, то на протяжении периода 2015-2021 годов инвестиции в основной капитал в ЦФО и ДФО росли стабильно быстрее, чем в среднем по России. Однако в период 2022-2023 годов ЦФО потерял лидерство по темпам прироста инвестиций и уступил его ЮФО и ПФО – регионам, до этого стабильно отстававшим по темпам прироста. Это вероятно, главным образом связано с низким уровнем безработицы и необходимостью локализации производства в регионах, а также с возросшими расходами на капитальное строительство в южных регионах России.

В частности, в ПФО в 2022-2023 годах наблюдался рост на 55% по сравнению с 15% в 2020-2021, 12% в 2018-2019 и снижением на 1,5% в 2016-2017. Лидерами по приросту в ПФО стали Чувашская Республика (на 93%), Нижегородская область (на 79%) и Республика Татарстан (на 71%), ранее значительно отстававшие от среднего значения темпов прироста по стране на протяжении 2015-2021 годов. Отстающими регионами по темпам прироста инвестиций по-прежнему являются Ульяновская область (прирост 23%), Пензенская область (прирост 24%) и Удмуртская республика (прирост 33%). Средний уровень инвестиций в эти регионы за период – ниже среднего по стране, что говорит о присутствии значительного потенциала для дальнейшего перетока капитала в отстававший ранее ПФО.

ДФО стабильно на протяжении всего рассматриваемого периода наращивает инвестиции быстрее, чем в среднем по стране. При этом самый значительный рост наблюдается в 2022-2023 гг. (до 68%) по сравнению с предыдущими периодами (22% в 2020-2021).

В ЦФО шесть регионов потеряли лидерство по темпам прироста инвестиций в 2022-2023 гг. (вклю-

чая г. Москву). За рассматриваемый период быстрее среднего росли темпы прироста во Владимирской, Тверской и Ивановской областях. При этом во Владимирской области темпы прироста отставали в течение всего рассматриваемого периода, а в Тверской – в 2018-2021 годах. Это является очередным подтверждением гипотезы о перетоке капитала в относительно депрессивные регионы за период 2022-2023 гг. В данном случае эта тенденция отмечается даже внутри округов-лидеров.

**Обсуждение.** Многие рейтинговые агентства составляют и публикуют рейтинги инвестиционной привлекательности регионов. Например, рейтинговое агентство *Expert* ежегодно формирует рейтинг инвестиционной привлекательности регионов, присваивая регионам с наивысшим уровнем инвестиционной привлекательности уровень А-1, следующим за ними регионами – уровень А-2, далее уровни А-3, В-1, В-2, В-3 и С.

Различия в инвестиционном климате регионов также находят отражение в разнообразных рейтингах. Например, согласно результатам национального рейтинга состояния инвестиционного климата 2024 года первое место в рейтинге занимает Москва (причем, шестой год подряд). На втором месте находятся Республика Татарстан и Нижегородская область, на третьем – республика Башкортостан, Московская и Тюменская области.

**Выводы.** В заключение необходимо отметить, что единой общепризнанной теории движения капитала на сегодняшний день не существует. Сторонники разных экономических школ по-разному трактуют отдельные вопросы, уделяют разное внимание тем или иным формам перемещения капитала. Поступление иностранных инвестиций в российскую экономику за последние два года значительно сократилось, в то время как их изъятие увеличилось. В ходе проведенного анализа выявлен высокий уровень концентрации регионального размещения инвестиций в российской экономике, что является следствием неравномерного развития и различной инвестиционной привлекательности регионов. В то же время наметившееся усиление отраслевой диверсификации инвестиций создает предпосылки для диверсификации их регионального размещения.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Булатов А.С., Квашнин Ю.Д., Ребрей С.М., Сенюк Н.Ю., Тагулов К.Г. Международное движение капитала: тенденции и перспективы. Мировая экономика и международные отношения, 2018, Том 62, № 8. – С. 16-25.

2. Головнин М.Ю., Никитина С.А. Современные тенденции динамики международных потоков капитала. // Мир новой экономики. – 2018. – № 12 (4). – С. 46-56.

3. Головнин М.Ю. Трансграничное движение капитала в России: перспективы трансформации внутренней и географической структуры. // Финансы: теория и практика. – 2020. – № 24 (6). – С. 161-173.

4. Гурова И.П. Региональное распределение прямых иностранных инвестиций в российской экономике. // Регион: экономика и социология. – 2019. – № 3 (103). – С. 216-239.

5. Дементьев М.П. Входящие и исходящие иностранные инвестиции в экономике современной России. // ЭКО. – 2022. – № 2. – С. 115-139.

6. Ельшин Л.А. Моделирование национальной экономики на основе исследования межотраслевых связей движения капитала. // Экономика, предпринимательство и право. – 2021. – Т. 11, № 8. – С. 1893-1914.

7. Ерошкин А.М., Петров М.В. Участие России в международном движении капитала. // Вестник финансового университета. – 2015. – № 6. – С. 82-95.

8. Котова И.Б., Золотова А.И., Агапова А.В. Пути и методы предотвращения «бегства» капитала за рубеж. // Бюллетень инновационных технологий. – 2020. – Т. 4., № 4 (16). – С. 22-27.

9. Кузнецов В.А., Фалина Н.В. Особенности международного движения капитала в условиях развития мировой экономики. Экономика и социум, 2015. – № 2(15). – С. 1319-1323.

10. Марковская Е.И., Исаков М.А. Теоретические и практические аспекты влияния международного капитала на экономику России. // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент». – 2016. – № 1. – С. 75-80.

11. Марковская Е.И., Белов А.В. Эмпирический анализ влияния экономических и неэкономических факторов оттока капитала: пример построения эконометрической модели. // Вестник финансового университета. – 2017. – Т. 21, № 2. – С. 121-131.

12. Мировая экономика и международные экономические отношения. Полный курс: учебник. Под ред. Булатова А.С. М.: КНОРУС, 2017. – 916 с.

13. Петренко И.А. Влияние движения международного капитала на экономическую безопасность стран с развивающимися рынками. // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. – 2017. – Т. 13. № 10. – С. 1870-1881.

14. Регионы России. Социально-экономические показатели. // Статистический сборник. Росстат. М., 2023. – 1126 с.

15. Российская модель вывоза капитала. Монография. Под ред. Булатова А.С. М.: МГИМО, 2014. – 82 с.

16. Сулейманов М.Д., Михин А.А. Миграция капитала (теория и практика). Монография. М.: МНИ, 2012. – 123 с.

17. Табакова А.С. Зарубежный опыт государственного регулирования вывоза капитала. // Инновации и инвестиции. – 2020. – № 9. – С. 72-76.

18. Табакова А.С. Проблемы при проведении оценки вывоза капитала за рубеж в рамках финансовой безопасности РФ. // Инновации и инвестиции. – 2021. – № 9. – С. 182-184.

19. Шевченко И.В., Третьякова М.К. Анализ прямых иностранных инвестиций: региональный аспект. // Вестник университета. – 2021. – № 5. – С. 162-168.

20. Шмелева Е.С., Ромашова И.А., Синева Н.Л., Яшкова Е.В. Международное движение капитала: сущность, структура, динамика. // Инновационная экономика: перспективы развития и совершенствования. – 2018. – № 5(31). – С. 182-187.

21. Щербаков В., Терещенко Д. Верификация региональной мобильности капитала в Российской Федерации: пространственно-эконометрический подход. // Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика. – 2023. – № 39 (1). – С. 102-126.

22. Юзеева В.В. Особенности движения капитала в условиях глобализации. // Вестник Челябинского государственного университета. – 2015. – № 11 (366). – С. 121-129.

23. Национальный инвестиционный рейтинг // Агентство стратегических инициатив. Электронный ресурс. Режим доступа: (дата обращения 17.11.2024).

24. Официальный сайт Банка России. Электронный ресурс. Режим доступа: (дата обращения 17.11.2024).

*Статья поступила в редакцию 29.11.2024*
*Статья принята к публикации 13.12.2024*

УДК 004.9
EDN: WXBORF

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОДДЕРЖКИ ИНЖЕНЕРНОГО МЫШЛЕНИЯ В ЕДИНОМ ИНФОРМАЦИОННОМ ПРОСТРАНСТВЕ ПРЕДПРИЯТИЯ

© Авторы 2024

SPIN: 3707-6260,
AuthorID: 330112
ORCID: 0000-0001-7766-3011
ScopusID: 42661608400

**ИВАЩЕНКО Антон Владимирович,** доктор технических наук, профессор,
директор Передовой медицинской инженерной школы
*Самарский государственный медицинский университет*
*(443099, Россия, Самара, ул. Чапаевская, 89, e-mail: anton.ivashenko@gmail.com)*

SPIN: 2681-8769,
AuthorID: 1115288
ORCID: 0009-0004-1127-0978
ScopusID: 6602860360

**ТЕРЕХИН Михаил Александрович**, аспирант
*Пензенский государственный технологический университет*
*(440039, Россия, Пенза, пр-д Байдукова, 1А, e-mail: terexin.m.a@yandex.ru)*

**Аннотация.** В статье предложена новая концепция роботизированного ассистента инженерного творчества. Приведена формально-логическая модель инженерной деятельности, обеспечивающая терминологическую и онтологическую основу системы человеко-компьютерного взаимодействия, позволяющей интегрировать пользовательскую активность и результаты обработки данных средствами машинного зрения в смешанную среду инженерного и искусственного интеллекта. Основная идея состоит в описании совокупности дизайн-решений, показателей назначения и аффордансов в виде графа специального вида, отражающего варианты реализации технического проекта в альтернативных исполнениях. Предложенная модель была реализована в составе программного комплекса поддержки инженерного мышления пользователей в составе интегрированной информационной среды предприятия. Для этого была разработана архитектура технологии поддержки инженерного мышления в едином информационном пространстве. Реализацию предложенной выше формальной модели можно произвести в рамках предлагаемых бота и генератора проектных решений с использованием технологий искусственного интеллекта и машинного зрения для анализа поведения пользователя. Для исследования предложенной модели и архитектуры был проведен эксперимент на базе Передовой медицинской инженерной школы Самарского государственного медицинского университета. Результаты проведенных исследований подтвердили практическую значимость предложенных технологий, а опыт внедрения, предложенного в данной статье подхода на практике, позволил усилить подготовку специалистов в области медицинской инженерии.

**Ключевые слова:** инженерная поддержка изделия, информационные технологии, инженерное творчество, единое информационное пространство предприятия, информационная поддержка принятия решений.

# ENGINEERING CREATIVITY SUPPORT INFORMATION TECHNOLOGIES IN ENTERPRISE SOLID INFORMATION SPACE

© The Authors 2024

**IVASCHENKO Anton Vladimirovich,** doctor of Technical Sciences, professor,
director of the Higher School of Medical Engineering
*Samara State Medical University*
*(443099, Russia, Samara, Chapayevskaya st., 89, e-mail: anton.ivashenko@gmail.com)*

**TEREKHIN Mikhail Aleksandrovich,** postgraduate student
*Penza State Technological University*
*(440039, Penza, Baidukova proezd/Gagarin Street, 1a/11, e-mail: terexin.m.a@yandex.ru)*

**Abstract.** The paper presents a new concept of a robotic assistant for engineering creativity. A formal logical model of engineering activity is presented, providing a terminological and ontological basis for the human-computer interaction system that allows integrating user activity and the results of data processing by means of machine vision into a mixed environment of engineering and artificial intelligence. The main idea is to describe a set of design solutions, purpose indicators and affordances in the form of a special graph reflecting the options for implementing a technical project in alternative designs. The proposed model was implemented as part of a software package to support users' engineering thinking as part of an integrated information environment of an enterprise. For this purpose, architecture for the technology to support engineering thinking in a single information space was developed. The implementation of the formal model proposed above can be produced within the framework of the proposed bot and generator of design solutions using artificial intelligence and machine vision technologies to analyze user behavior. To study the proposed model and

architecture, an experiment was conducted at the Higher School of Medical Engineering in Samara State Medical University. The results of the conducted research confirmed the practical significance of the proposed technologies, and the experience of implementing the approach proposed in this article in practice made it possible to strengthen the training of specialists in the field of medical engineering.

**Keywords:** CALS, information technology, engineering creativity, enterprise solid information space, decision-making support.

*Для цитирования: Иващенко А.В. Информационные технологии поддержки инженерного мышления в едином информационном пространстве предприятия / А.В. Иващенко, М.А. Терехин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 4(68). – С. 46-54. – EDN: WXBORF.*

**Введение.** Применение *CALS* технологий непрерывной информационной поддержки поставок и жизненного цикла изделий [1] в настоящее время является стандартом для промышленных предприятий. Реализация этих технологий в том числе предусматривает реализацию управления инженерными данными на основе информационных PDM систем управления данными об изделии [2, 3]. Таким образом, деятельность инженерно-технических работников предприятия объединяется в единое информационное пространство.

Современные технологии инженерного проектирования и производства выстраиваются относительно концепции цифровых двойников [4-8]. Основная идея состоит в построении функционально полной модели изделия в виртуальной среде, которая определяет функциональные требования, показатели назначения и внешний облик изделия и позволяет производить конструирование, моделирование, исследование и анализ изделия в едином цифровом контуре, охватывающем разные этапы его жизненного цикла. Реализация этой концепции обеспечивает принципиально новые возможности по созданию современной техники, однако, требует от инженерного персонала освоения дополнительных компетенций по информационному взаимодействию, коллегиальному принятию решений и генерации и апробации технических идей и проектов.

В частности, актуальной задачей развития персонала научно-производственных предприятий на базе концепции цифровых двойников является освоение комплекса теоретических знаний и практических навыков, относящихся к направлению инженерного мышления. Исследования в данном направлении широко известны в России и за рубежом: это работы Г.С. Альтшуллера [9], Г.П. Щедровицкого [10], Д. Пойа [11] и др. Также широко применяются технологии дизайн-мышления [12-14].

Освоение инженерного мышления является крайне сложной задачей – оно требует хорошего теоретического базиса, для чего необходимо надежное понимание принципов современной физики, теории механизмов и машин, теории сопротивления материалов, информационных технологий, а также владение средствами формализации и визуального отображения результатов инженерной деятельности в рамках математического аппарата, формальной логики и инженерной графики. В то же время, от современного инженера требуется достаточно широкий кругозор на разных уровнях абстрагирования, что позволяет генерировать новые идеи и воплощать их как на уровне моделирования, так и в реальных образцах технически сложных изделий.

В настоящее время проблемы развития инженерного мышления приобрели новую актуальность, в том числе в связи с внедрением *CALS* технологий на всех этапах проектирования и производства, реализации информационных технологий цифровых двойников и в целом в связи с цифровой трансформацией процессов разработки инновационной техники. Реализация технологий искусственного интеллекта [15], в частности, методов и средств машинного зрения [16], позволяет повысить эффективность обработки больших объемов графического материала, что позволяет сократить время и трудоемкость сравнительного анализа различных проектных решений, и их коллегиальной обработки в едином информационном пространстве предприятия.

Реализация такого решения на практике может быть выполнено в виде активного программного компонента (программного агента) единого информационного пространства предприятия, представляющего собой роботизированного ассистента проектировщика. Функциональность такого ассистента включает обработку графо-символической информации в результате интеллектуального анализа технической документации средствами машинного зрения, обеспечение доступа в репозиторий инженерных решений для использования шаблонов параметризованных моделей в процессе конструирования, генерацию новых технических решений и сопоставление, сравнительный анализ и слияние существующих технических решений в интересах совершенствования показателей назначения.

В процессе создания такого ассистента важно выстроить процесс человеко-компьютерного взаимодействия с использованием современных интерактивных пользовательских интерфейсов [17-19]. *CALS* технологии предусматривают визуализацию проектных решений в двумерном и трехмерном виде, а также интерактивные аппаратно-программные средства обработки этих моделей. Однако система анализа поведения пользователя *CALS*

технологий в процессе творческой деятельности в настоящее время отсутствует. В данной статье предложена формально-логическая модель инженерной деятельности пользователя единого информационного пространства предприятия, позволившая построить подсистему машинного зрения для контроля его действий и стимулирования инженерного творчества, и приведены первые результаты анализа двигательной активности глаз различных групп пользователей при решении творческих задач, подтверждающие необходимость применения технологий искусственного интеллекта для стимулирования инженерной деятельности.

**Методология.** В рамках решения задачи разработки роботизированного ассистента инженерного творчества построим формально-логическую модель инженерной деятельности. Данная модель обеспечит терминологическую и онтологическую основу системы человеко-компьютерного взаимодействия, позволяющей интегрировать пользовательскую активность и результаты обработки данных средствами машинного зрения в смешанную среду инженерного и искусственного интеллекта. Предложенная модель была реализована в составе программного комплекса поддержки инженерного мышления пользователей в составе интегрированной информационной среды предприятия.

Рассмотрим, для некоторого изделия (*component*) $c_i$ разработано и существует несколько проектов или дизайн-решений (*design*) его реализации $d_{i,j}$. Каждый проект обладает рядом параметров, обеспеченных техническими или технологическими идеями:

$$d_{i,j} = d_{i,j}\left(c_i, \{p_{i,j,k}\}, \{s_{i,j,l}\}\right), \quad (1)$$

где $\{p_{i,j,k}\}$ набор характерных параметров (parameters);

$\{s_{i,j,l}\}$ – определяющий значения параметров набор технических или технологических идей (*solutions/sparks*).

Предположим, что группа пользователей обладает определенной онтологией восприятия – картиной мира $\Omega_n$, определяющей возможности применения разработанного изделия в исполнении дизайна $d_{i,j}$ в соответствии с заданным назначением.

Такое применение в теории технического дизайна и психологии мышления описывается понятием «аффорданс» [20, 21]. Аффорданс, в отличие от параметров и свойств, отражающих общие характеристики объекта, заключает в себе пригодность для достижения цели субъекта в данной ситуации. Аффорданс задает связь между свойствами объекта и возможностями агента, которые определяют, каким образом объект может быть использован [22], то есть:

$$a_{i,j,n,m} = a_{i,j,n,m}\left(d_{i,j}, \Omega_n, g_m\right) = \{0,1\}, \quad (2)$$

где $g_m$ цель или показатель назначения (*goal*), $a_{i,j,m,n}$ – Булева функция, принимающая значение «1» в случае достижения показателя назначения и «0» иначе.

Отметим, что разделение свойств объекта на две группы характерных параметров и показателей назначения позволяет разделить области конструктивных особенностей реализации и области применения изделия. Соответственно, реализованные в объекте идеи и конструктивные решения позволяют расширить область применения, обеспечив универсальные свойства изделия. Такой подход ближе к эволюционному подходу, когда новые технические решения не отменяют, но расширяют сферы его применения, что определяет свойство преадаптации.

В заданных определениях задачу оптимального проектирования сложных технических изделий можно поставить следующим образом. Необходимо найти в рамках одного дизайн решения комплекс технических и технологических идей, обеспечивающий удовлетворение всех требований назначения $\{g_{m^*}\}$:

$$\exists d_{i,j} : \sum_{m^*} g_{m^*}\left(\sum_{n,m} \delta(g_m = g_{m^*}) \cdot \left(1 - a_{i,j,n,m}\left(d_{i,j}, \Omega_n, g_m\right)\right)\right) \to 0, \quad (3)$$

где $\delta(x) = \begin{cases} 1, x = true, \\ 0, x = false. \end{cases}$

Исходя из понятий введенной модели, этому решению будет скорее соответствовать максимум аффордансов в каждом новом дизайн решении:

$$\forall d_{i,j} : \sum_{m^*,\, n} a_{i,j,n,m^*}\left(d_{i,j}, \Omega_n, g_{m^*}\right) \to \max. \quad (4)$$

Можно заметить, что росту количества аффордансов при этом способствует увеличение количества или расширение онтологий $\Omega_n$, что соответствует увеличению количества вовлеченных инженеров и приведению их к единой системе понятий. Следовательно, для максимизации аффордансов необходимо максимально расширить минимальную общую онтологию всех участников процесса проектирования.

Совокупность дизайн-решений, показателей назначения и аффордансов образует граф специального вида, отражающий варианты реализации технического проекта в альтернативных исполнениях.

В психологии практического мышления аффорданс определяют, как интуитивно понятную функцию, доступную для использования без специального обучения [23], однако, с этим тезисом можно поспорить, так как любой опыт развивает интуицию, а образовательный процесс может быть специально на это направлен. Диагностировать интуитивное знакомство с функцией можно косвенно по данным мониторинга внимания пользователей, автоматически производимого с помощью средств окулографии.

Событие фиксации взора пользователя в некоторой координате реального или виртуального пространства $g_y = \left(\tilde{x}_y, \tilde{y}_y, \tilde{z}_y\right)$ определяется булевой переменной:

$$e_{x,y,z} = e_{x,y,z}\left(u_x, g_y, t_{x,y,z}\right) = \{0,1\}, \quad (5)$$

где $u_x$ – пользователь, $t_{x,y,z}$ – время наступления события, $z$ – порядковый номер события.

Сопоставим каждой онтологии $\Omega_n$ шаблон внимания, соответствующий типовому треку взора

пользователя:

$$\Omega_n : \left\{\varepsilon_{n,y^*,z^*} = \varepsilon_{n,y^*,z^*}\left(g'_{n,y^*}, \Delta t_{n,z^*}\right)\right\} \quad (6)$$

Таким образом, факт наличия картины мира у отдельного пользователя фиксируется по остановке взгляда на контрольных точках:

$$F(u_x, \Omega_n) = \sum_{x,y,zm,y^*,z^*} \sum e_{x,y,z} \cdot \varepsilon_{n,y^*,z^*} \cdot \delta\left(g_y \in g_{n,y^*} \pm \vartheta\right) \cdot \delta\left(t_{x,y,z} \in \left[t_n^0, t_n^0 + \Delta t_{n,z^*}\right]\right) \to \max, \quad (7)$$

где $\vartheta$ – геометрическая окрестность точки $g_{n,y^*}$, $t_n^0$ – начало действия системы понятий, свойственной картине мира $\Omega_n$.

Критерий (7) не нормирован, поскольку от пользователя нельзя требовать заданной плотности и дискретности событий $e_{x,y,z}$. В связи с этим, трек взора пользователя фиксируется не заданным значением или индикатором, а тепловой картой, характеризующей заданный темпо-ритм взора в соответствии с типовой наблюдаемой картиной.

Решение этой задачи иллюстрирует приведенный ниже эксперимент.

**Результаты.** Реализация роботизированного ассистента инженерного творчества представляет собой модуль (компонент программного обеспечения), интегрированный в *PDM* систему управления инженерными данными в виде плагина или программного агента.

Предлагаемая архитектура программного решения приведена на рисунке 1. В составе автоматизированного рабочего места (АРМ) конструктора дополнительно к средствам системы автоматизированного проектирования (САПР), инженерным справочникам материалов и стандартных изделий, терминалу системы управления инженерными данными и другим стандартным инженерным приложениям добавить бот системы поддержки принятия решений по разработке проектной документации и генератор проектных решений. Доступ к функциональности этих модулей производится в рамках существующих интерактивных пользовательских интерфейсов.

Единое информационное пространство в этом случае представлено электронным архивом проектной документации, стандартно поставляемой в рамках внедрения системы управления инженерными данными. Для унификации проектных решений предлагается дополнительно реализовать библиотеку типовых документов и собственно базу знаний инженерных решений, построенную с использованием современных технологий инженерии знаний в виде семантического описания продукции средствами онтологии.

Для поддержки такой реализации на семантическом уровне предлагается дополнительно к дереву деталей и сборочных единиц (ДСЕ), содержащему трехмерные (*3D*) модели изделий и соответствующей проектной документации по комплектам на изделие реализовать семантическое описание шаблонов решений, позволяющих кластеризовать и обобщить возможные аналоги и варианты исполнения и обобщить техническое описание инженерных данных, необходимое и достаточное для их параметризации. Новые компоненты единого информационного пространства на рисунке 1 выделены рамкой.

Реализацию предложенной выше формальной модели можно произвести в рамках предлагаемых бота и генератора проектных решений с использованием технологий искусственного интеллекта и машинного зрения для анализа поведения пользователя.

С целью исследования предложенной модели и архитектуры был проведен эксперимент, результаты которого приведены ниже в настоящем разделе. Эксперимент проводился на базе Передовой медицинской инженерной школы Самарского государственного медицинского университета, в которой производится подготовка кадров по медицинской инженерии. Целью подготовки является освоение компетенций на стыке медицинских и технических наук, для чего в университете организовано углубленное освоение принципов инженерного мышления.

В рамках тестирования было предусмотрено прохождение 11 различных заданий по решению логических и изобретательских задач. Тестирование было автоматизировано, что позволило отслеживать внимание пользователя и его активность в ходе выработки и анализа различных вариантов решения. Наиболее наглядно результаты иллюстрируют задачи на логическое мышление, представленные на рисунках. 2 и 3.

Задача, представленная на рисунке 2 называется «Инспектор Варнике похищение старинного бокала». Впервые задачи про инспектора появились в журнале Eulenspiegel [24], издававшемся в ГДР, позднее были опубликованы в журнале «Наука и жизнь». Задача, представленная на рисунке 3 называется «Кто куда?», впервые была опубликована в СССР [25]. Эти задачи направлены на развитие наблюдательности и внимательности, поскольку для разгадки необходимо обратить внимание на сопровождающее задачу изображение.

В эксперименте принимало участие 20 человек, которые были разделены на 4 группы по 5 человек. Две группы были составлены из медицинских специалистов и две из технических специалистов, при этом в группах технических специалистов первая группа выступила в качестве контрольной, а для второй было проведено образовательное мероприятие. Среди двух групп медиков также первая группа выступила в качестве контрольной, а для второй было проведено аналогичное образовательное мероприятие.

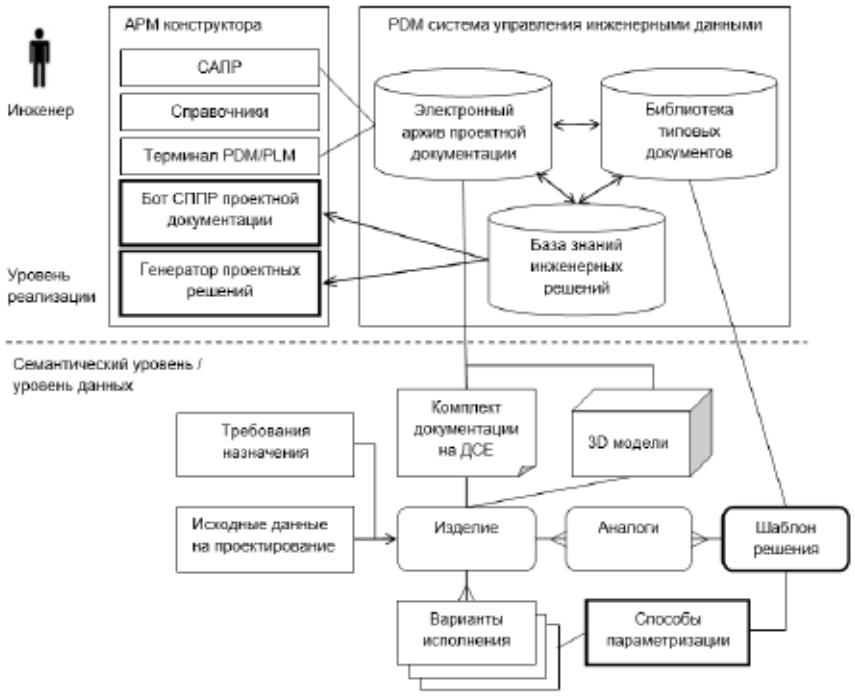



*Рисунок 1 – Архитектура технологии поддержки инженерного мышления в едином информационном пространстве предприятия*




*Рисунок 2 – Типовые задачи, используемые для тестирования логического мышления (реализация в автоматизированной системе тестирования). Задача 1 (слева). «Инспектор Варнике. Похищение старинного бокала»*

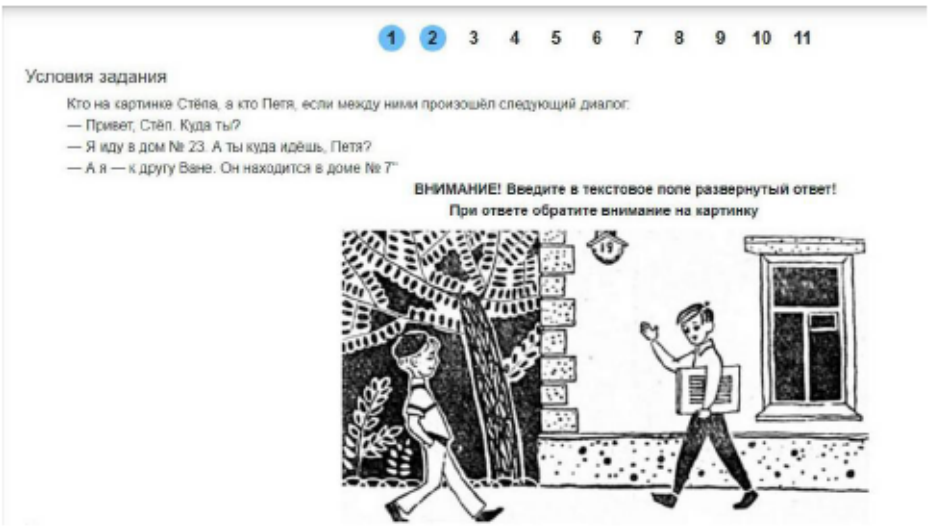



*Рисунок 3 – Типовые задачи, используемые для тестирования логического мышления (реализация в автоматизированной системе тестирования). Задача 2 «Кто куда?»*

В ходе образовательных мероприятий был проведен краткий курс введения в ТРИЗ, с правилом решения задач и их содержанием исследуемые не знакомились.

Обработка результатов проводилась следующим образом. При прохождении эксперимента велась запись экрана. Из полученной видеозаписи были сделаны скриншоты с шагом дискретизации 5 секунд, что обеспечило максимальную адекватность получаемых тепловых карт. После того как были получены результаты на каждого испытуемого по двум задачам, объединили тепловые карты в соответствии с делением групп испытуемых.

Из полученных результатов, представленных на рисунках 4 и 5, видно на какие объекты испытуемые обращали большее внимание, эти зоны обозначены красным цветом.

Также нельзя не заметить, что испытуемые несколько раз перечитывали условия задачи и возвращались к картинкам.

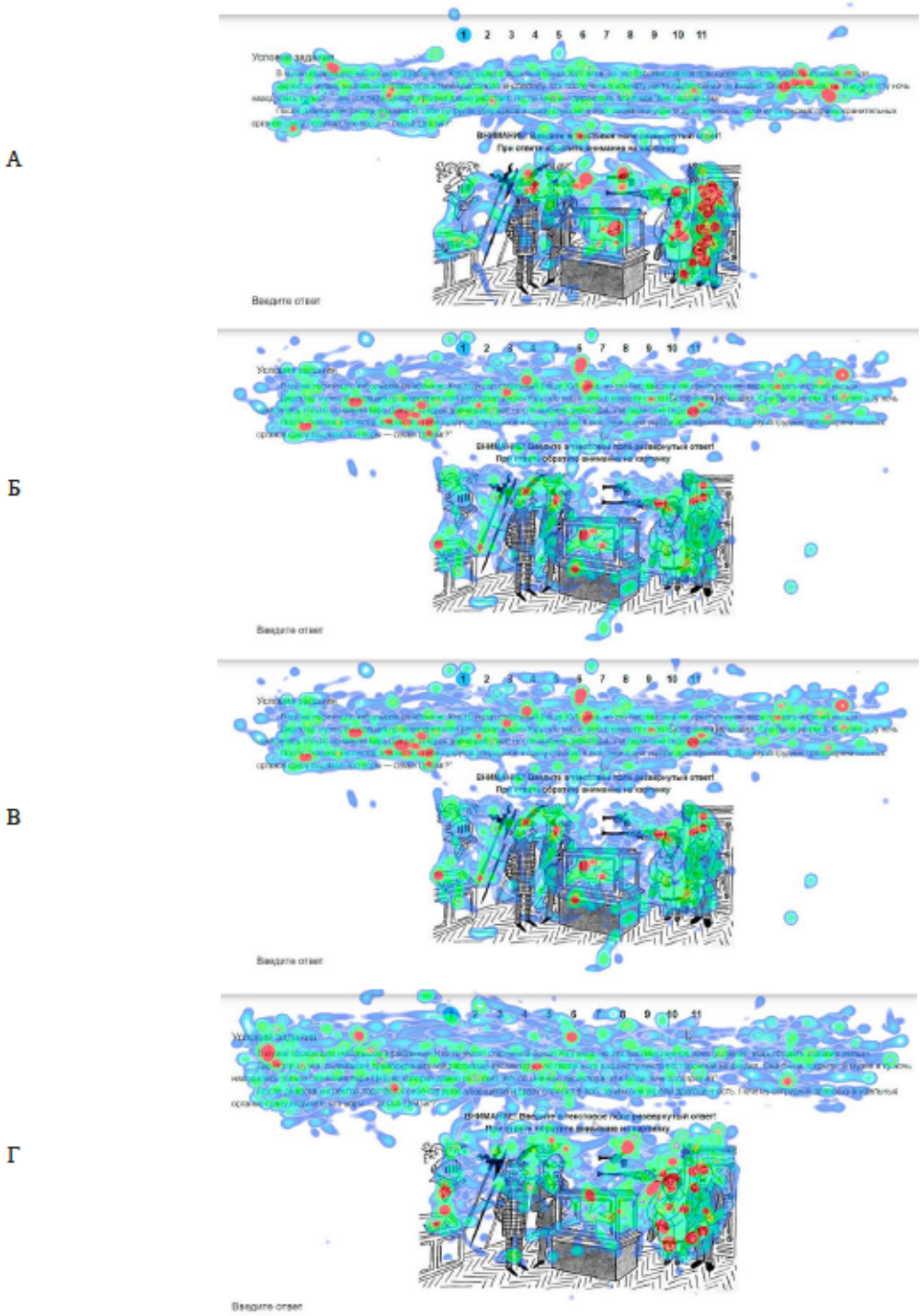



*Рисунок 4 – Тепловые карты испытуемых при решении задачи №1 по группам:*
*А – Контрольная группа технических специалистов; Б – Экспериментальная группа технических специалистов;*
*В – Контрольная группа медицинских специалистов; Г – Экспериментальная группа медицинских специалистов*

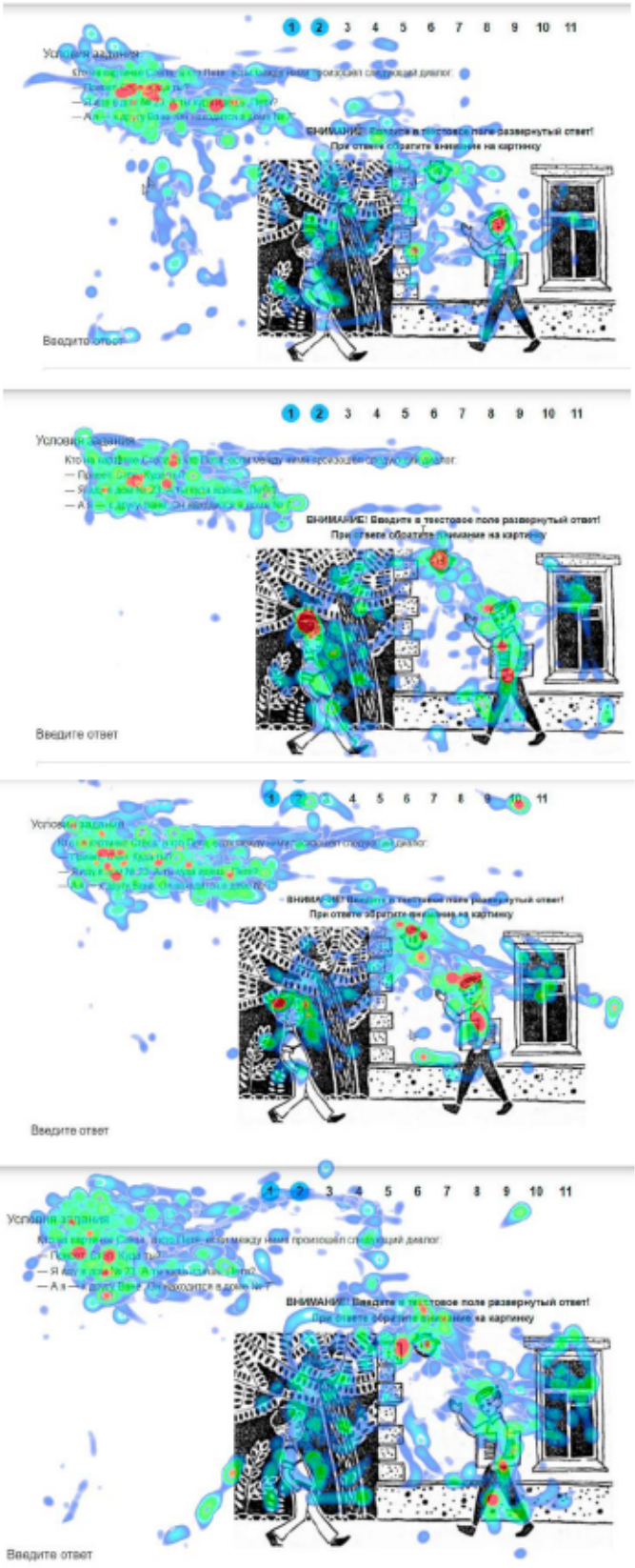



*Рисунок 5 – Тепловые карты испытуемых при решении задачи №2 по группам:*
*А – Контрольная группа технических специалистов; Б – Экспериментальная группа технических специалистов;*
*В – Контрольная группа медицинских специалистов; Г – Экспериментальная группа медицинских специалистов*

Рисунки 6 и 7 обобщают полученные результаты по 11 задачам.

Можно заметить, что проведение обучения позволяет повысить результативность прохождения тестов при сохранении затраченного времени, необходимого для их прохождения.

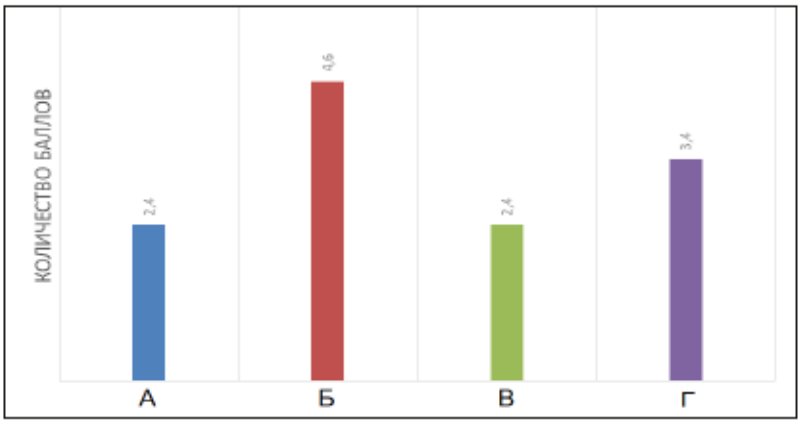



*Рисунок 6 – Результативность решения задач*
*А – Контрольная группа технических специалистов; Б – Экспериментальная группа технических специалистов; В – Контрольная группа медицинских специалистов; Г – Экспериментальная группа медицинских специалистов*

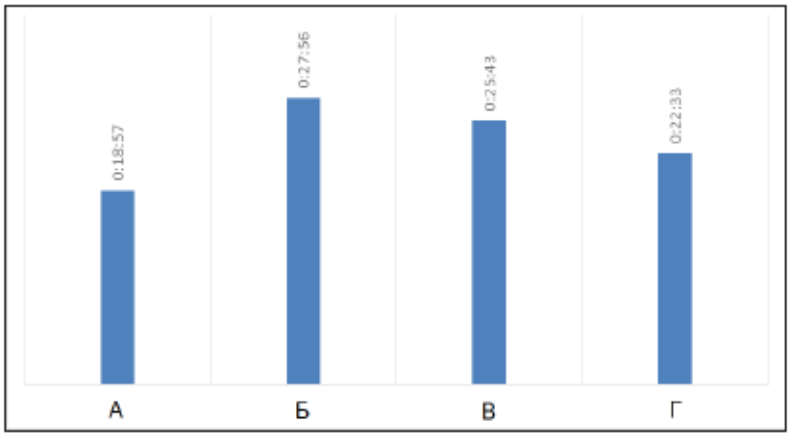



*Рисунок 7 – Среднее время решения задач*
*А – Контрольная группа технических специалистов; Б – Экспериментальная группа технических специалистов; В – Контрольная группа медицинских специалистов; Г – Экспериментальная группа медицинских специалистов*

**Обсуждение.** Проведенное исследование показало, что дополнительная подготовка специалистов по современной инженерии как с техническим, так и с медицинским образованием показывает положительные результаты. При этом направленность такой подготовки должна быть ориентирована на разработку дизайн-решений с максимальным количеством аффордансов, позволяющих наиболее эффективно создавать варианты реализации технического проекта в альтернативных исполнениях.

При этом, в связи с профессиональной специализацией, технические специалисты лучше справляются с логическими задачами. Однако, освоение инженерных компетенций также возможно на базе медицинского образования, возникающие при этом трудности преодолимы путем построения корректных аналогий на базе общего семантического базиса понятий.

В ходе эксперимента проводился также анализ тепловых карт, отражающих концентрацию взора пользователя на отдельных фрагментах задачи. Чем дольше испытуемый фокусируется на точке в области экрана, тем ярче цвет на тепловой карте. Граница цветов голубой – зеленый – желтый – красный, где красный означает длительную фиксацию. Саккады обозначают перемещение взгляда и на тепловых картах представляют собой затухающие мазки.

Тепловые карты позволили отследить логику рассуждения испытуемого. Например, если при прохождении эксперимента, испытуемый сфокусируется на конкретном объекте, который является разгадкой к решению задачи, то вероятность выбора правильного решения повышается.

Таким образом, отслеживание активности сотрудника в процессе творческой инженерной деятельности на основе анализа траектории его взгляда позволяет определить основные тенденции в изменении внимания и реализовать поддержку принятия решений. В целом, несмотря на сложность и субъективность творческой деятельности, процесс ее информационной поддержки и стимулирования может быть формализован и автоматизирован как на образовательном уровне освоения соответствующих компетенций, так и непосредственно на уровне инженерной деятельности, путем реализации соответствующих роботизированных помощников и ботов.

Для реализации таких возможностей на практике могут быть использованы не только технологии информационной поддержки изделий в едином информационном пространстве предприятия, но и элементы искусственного интеллекта, позволяющие реализовать кластеризацию основных решений, найти общие параметры и отличительные свойства.

Формализовать такой подход можно путем параметризации проектных решений на семантическом уровне и внедрения такого показателя дизайн-решений как количество аффордансов. Оптимизация этого показателя основана на максимальном расширении минимальной общей онтологии участников совместной инженерной деятельности. Таким образом, удается направить инженерную деятельность на поиск и реализацию конструктивных решений, которые расширяют область применения, обеспечив универсальные свойства изделия.

**Выводы.** Предложенные в статье модель и архитектура системы поддержки инженерного мышления в едином информационном пространстве предприятия позволяют расширить функциональные возможности систем автоматизированного проектирования и инженерной поддержки изделий. Современные технологии искусственного интеллекта позволяют автоматизировать поиск эффективных инженерных решений для повторного использования и тиражирования, а также реализовать синтез новых дизайн-решений на базе известных аналогов.

В этом контексте удается по-новому рассмотреть творческую деятельность инженера, которая ранее представляла собой скорее объект искусства, нежели регламентированный процесс разработки. Такой подход придает новую актуальность практического использования известных теорий стимулирования творческой работы, таких как ТРИЗ, дизайн-мышление и т.п. Это расширяет перспективы развития инженерного мышления на практике.

Опыт внедрения, предложенного в данной статье подхода на практике, позволил усилить подготовку специалистов в области медицинской инженерии на практике, а результаты проведенных исследований подтвердили практическую значимость предложенных технологий. Описанная в данной статье модель стала также основой дальнейших исследований, которые запланированы в направлении автоматизации инженерной деятельности и реализации технологий искусственного интеллекта для поддержки принятия инженерных решений.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования: учеб. для студентов вузов, обучающихся по направлению подгот. дипломир. специалистов «Информатика и вычисл. Техника», изд. 4. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 433 с.

2. Цифровые технологии в жизненном цикле российской конкурентоспособной авиационной техники / Под редакцией М.А. Погосяна. М.: МАИ, 2020. – 448 с.

3. Щеглов Д.К. Методика выбора PDM-системы для предприятия ракетно-космической отрасли // Инновации. – 2011. – № 5 (151). – С. 107-114.

4. Боровков А.И., Кулемин В.Ю. Цифровой инжиниринг для создания изделий высокой степени технологической сложности на основе цифровых двойников // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. – 2024. – № 3 (133). – С. 98- 104.

5. Боровков А., Бураков В., Мартынец Е., Рябов Ю., Щербина Л. Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников (Digital Twins) CML-BENCH® (Часть 1) // САПР и графика. – 2023. – № 8 (324). – С. 42-51.

6. Боровков А., Бураков В. Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников (Digital Twins) CML-BENCH® (Часть 2) // САПР и графика. – 2023. – № 9 (325). – С. 54-64.

7. Боровков А., Мартынов И., Шандер И., Горский Ю., Житков Ю., Волков А., Мартынец Е. Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников (Digital Twins) CML-BENCH® (Часть 3) // САПР и графика. – 2023. – № 10 (326). – С. 50-62.

8. Халиулин Р.А. Цифровые двойники как инструмент мониторинга производственных процессов в Индустрии 4.0 // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – Т. 25. – № 2. – 2023. – С. 45-50.

9. Альтшуллер Г. Найти идею: Введение в ТРИЗ теорию решения изобретательских задач. Альпина Паблишер, 2008. – 409 с.

10. Оргуправленческое мышление: идеология, методология, технология (курс лекций). – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Изд-во Студии Артемия Лебедева, 2014. – 468 с.

11. Schoenfeld A. Polya, Problem Solving, and Education // Mathematics Magazine. 60, 1987. – P. 283-291.

12. Васильева Е.В., Точилкина Т.Е. Синергия подходов дизайн-мышления и процессной трансформации // Управление. – 2020. – Т. 8. – № 1. – С. 83-93.

13. Собиров Б.Ш. Дизайн и бизнес в цифровом мире: организационные особенности формирования дизайн-мышления // Эргодизайн. – 2022. – № 1 (15). – С. 14-23.

14. Богомолова И.С. Дизайн-мышление: от названия к сути метода // Архитектура и современные информационные технологии. – 2023. – № 4 (65). – С. 92-102.

15. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход. 4-е издание. Хобокен: Пирсон, 2021. – 1409 с.

16. Wiley V., Lucas T. Computer vision and image processing: a paper review // International Journal of Artificial Intelligence Research. – Vol. 2. – No 1. – 2018. – P. 28-36.

17. Иващенко А.В., Александрова М.В. Управление погружением пользователя в иммерсивную среду на примере системы психологического тестирования с обратной связью // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2024. – № 1. – С. 79-93.

18. Иващенко А.В., Александрова М.В., Жейков Д.С., Мазанкина Е.В., Захарова Е.В., Колсанов А.В. Реализация программного комплекса психодиагностики с обратной связью на основе компьютерного зрения // Программные продукты и системы. – 2024. – Том 37. – № 2. – С. 193-200.

19. Иващенко А.В., Александрова М.В., Жейков Д.С., Нестеров А.Ю. Семиозис визуальных стимулов в интерактивных пользовательских интерфейсах медицинских приложений // Онтология проектирования. 2024. – Т. 14. – №3(53). – С. 311-323.

20. Карелов С.В. «Ловушка Гудхарта» для AGI: проблема сравнительного анализа искусственного интеллекта и интеллекта человека // Ученые записки Института психологии Российской академии наук. – 2023. – Т. 3. – №3. – С. 5-22.

21. Bubeck S., Chandrasekaran V., Eldan R, Gehrke J., Horvitz E., Kamar E. et al. Sparks of Artificial General Intelligence: Early experiments with GPT-4 // Cornell University. 2023. – https://arxiv.org/abs/2303.1271225.

22. Norman D.A. The Design of Everyday Things. Revised and Expanded edition. – New York: Basic Books. – 2013.

23. Технологии сохранения и воспроизведения когнитивного опыта. – Москва, 2016. – С. 150-151.

24. Криминальные задачи с участием инспектора Варнике. – URL: http://yurpsy.com/files/varnike.htm (дата обращения: 11.10.2024).

25. 10 советских задач на внимание и смекалку – 12 января 2023 – 74.ру. – URL: https://74.ru/text/entertainment/2023/01/12/71964788/ (дата обращения: 11.10.2024).

*Статья поступила в редакцию 02.11.2024*
*Статья принята к публикации 13.12.2024*

УДК: 004.932
EDN: XAFWRX

# ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ИМПУЛЬСНАЯ КОДОВАЯ МОДУЛЯЦИЯ В ЗАДАЧАХ СЖАТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИХ БАЗИСОВ

© Автор(ы) 2024

SPIN: 1207-8499
AuthorID: 1067344
ORCID: 0009-0003-3723-0950
ScopusID: 57195317120

**БАСТРЫЧКИН Александр Сергеевич,** старший преподаватель кафедры «Электронные вычислительные машины»
*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина (390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1, e-mail: a_s_bas@mail.ru)*

SPIN: 1631-6422
AuthorID: 693807
ORCID: 0009-0006-2511-6917
ScopusID: 7102372281

**ГУСЕВ Сергей Игоревич,** доктор технических наук, профессор кафедры «Радиотехнические устройства», заведующий кафедрой «Космические технологии»
*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина (390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1, e-mail: s.i.gusev@inbox.ru)*

SPIN: 3897-5570
AuthorID: 496097
ORCID: 0000-0002-2984-4480
ScopusID: 56052044700

**КОСТРОВ Борис Васильевич,** доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электронные вычислительные машины»
*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина (390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1, e-mail: kostrov.b.v@evm.rsreu.ru)*

SPIN: 2166-8121
AuthorID: 722169
ORCID: 0000-0001-5829-8223
ScopusID: 57191847844

**БАБАЕВ Сергей Игоревич,** кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные вычислительные машины»
*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина (390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1, e-mail: babaev.s.i@gmail.com)*

**Аннотация.** Исследование и разработка методов сжатия изображений в системах передачи данных с существенными ограничениями на передающее оборудование и канал связи в настоящее время является актуальной задачей. В данной работе рассматривается подход к сжатию изображений с применением ортогональных преобразований на основе функций, определённых на конечных интервалах. Подобный подход позволяет сократить вычислительные затраты на переход к спектральному представлению изображения. Целью работы является исследование применения методов дифференциально-импульсной кодовой модуляции для квазидвумерного представления сигналов в задаче сжатия изображений. Рассматриваются различные варианты размерностей ортогональных базисов в совокупности с применением таких методов, как квантование сигналов, дифференциально-импульсная кодовая модуляция. Для устранения артефактов сжатия в работе применяется метод интерполяции по ближайшему соседу. Исследуются подходы к сжатию изображений на основе методологии обработки сигналов в квазидвумерном спектральном пространстве. Рассмотрены результаты обработки сигналов на основе ортогональных преобразований с различной размерностью базисных функций и числом уровней с применением равномерного квантования, оптимального квантования и дифференциально-импульсной кодовой модуляции. Применение рассмотренных методов позволит сжать изображение от 2 до 10 раз при приемлемом визуальном качестве восстановленных изображений.

**Ключевые слова:** сжатие изображений, секвентный анализ, квазидвумерный спектр, ортогональные преобразования, преобразование Уолша, дифференциально-импульсная кодовая модуляция, равномерное квантование, оптимальное квантование, квантование Ллойда-Макса, интерполяция изображений.

# DIFFERENTIAL PULSE CODE MODULATION IN IMAGE COMPRESSION PROBLEMS USING NON-TRIGONOMETRIC BASES

© Author(s) 2024

**BASTRYCHKIN Aleksandr Sergeevich,** senior lecturer of the Department of Electronic Computers
*Ryazan State Radio Engineering University named after V. F. Utkin*
*(59/1 Gagarina str., Ryazan, 390005, e-mail: a_s_bas@mail.ru)*
**GUSEV Sergey Igorevich,** doctor of technical sciences, professor of the Department of Wireless Devices, head of the Department of Space Technologies
*Ryazan State Radio Engineering University named after V. F. Utkin*
*(59/1 Gagarina str., Ryazan, 390005, e-mail: s.i.gusev@inbox.ru)*
**KOSTROV Boris Vasilevich,** doctor of technical sciences, professor, head of the Department of Electronic Computers
*Ryazan State Radio Engineering University named after V. F. Utkin*
*(59/1 Gagarina str., Ryazan, 390005, e-mail: kostrov.b.v@evm.rsreu.ru)*
**BABAEV Sergey Igorevich,** candidate of technical sciences, associate professor of the Department of Electronic Computers
*Ryazan State Radio Engineering University named after V. F. Utkin*
*(59/1 Gagarina str., Ryazan, 390005, e-mail: babaev.s.i@gmail.com)*

**Abstract.** Research and development of image compression methods in data transmission systems with significant limitations on the transmitting equipment and communication channel is currently an urgent task. In this paper, we consider an approach to image compression using orthogonal transformations based on functions defined on finite intervals. This approach reduces the computational cost of switching to the spectral representation of the image. The aim of this paper is to study the application of differential pulse code modulation methods for quasi-two-dimensional representation of signals in the problem of image compression. Various options for the dimensions of orthogonal bases are considered in combination with the use of such methods as signal quantization and differential pulse code modulation. To eliminate compression artifacts, we use the nearest neighbor interpolation method. Approaches to image compression based on the signal processing methodology in quasi-two-dimensional spectral space are investigated. The results of signal processing based on orthogonal transformations with different dimensions of basis functions and the number of levels using uniform quantization, optimal quantization, and differential pulse code modulation are considered. The use of these methods will allow you to compress the image from 2 to 10 times with an acceptable visual quality of the restored images.

**Keywords:** image compression, sequential analysis, quasi-two-dimensional spectrum, orthogonal transformations, Walsh transform, differential pulse code modulation, uniform quantization, optimal quantization, Lloyd-Max quantization, image interpolation.

*Для цитирования: Бастрычкин А.С. Дифференциально-импульсная кодовая модуляция в задачах сжатия изображений с использованием нетригонометрических базисов / А.С. Бастрычкин, С.И. Гусев, Б.В. Костров, С.И. Бабаев // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 4(68). – С. 55-61. – EDN: XAFWRX.*

**Введение.** В настоящее время разработано достаточно много методов сжатия данных. Однако остаётся актуальным вопрос устранения информационной избыточности в условиях, накладывающих ограничения на мощность и производительность вычислительных средств, а также требующих учёта энергетических ограничений канального оборудования.

В ряде работ [1-5], посвящённых сокращению вычислительных затрат, показана целесообразность использования преобразований, основанных на базисных функциях Виленкина-Крестенсона, в частности, функциях Уолша, минимально возможной их форме. Особый интерес и научная новизна заключается в исследовании возможности применения хорошо известного математического аппарата ортогональных преобразований на базе нетригонометрических функций Уолша и подходов, являющихся общими для алгоритмов сжатия изображений с потерями, таких как разделение на блоки и квантование.

**Методология.** Распространённым подходом в обработке изображений является разбиение изображений на блоки и выполнение дальнейших операций, таких как спектральные преобразования, исключение или квантование составляющих спектра, применение различных фильтров, и так далее. Подобный подход может существенно упростить вычисления, сделать их более универсальными, то есть подходящими для изображений разных размеров. Независимость операций по памяти и управлению делает возможным применение технологий параллельных вычислений.

В работе [3] обоснована целесообразность выбора квазидвумерного преобразования Уолша в комбинации с методами блочной обработки изображений. При данном подходе снижается размерность базиса системы ортогональных функций. Оптимальный

выбор размера блока, а соответственно и размерности ортогонального базиса, позволяет сократить время перехода к спектральному представлению исходного изображения. В работе показано, что для квазидвумерного представления оптимальными будут блоки размером от 8x8 до 64x64.

Качество восстановления сигнала и степень возможного сжатия при квантовании зависят от выбора количества уровней квантования, а также от того, какие конкретно значения присвоены набору уровней, и насколько они близки к значениям исходного сигнала.

В случае равномерного квантования на основе заданного числа уровней формируется вектор, в котором хранятся значения уровней, на которые разбивается диапазон квантуемых значений.

Чтобы найти оптимальные значения уровней квантования, необходимо заранее знать функцию плотности вероятности появления значений сигнала.

Для большого числа уровней (от 64 и выше) и сигналов, являющихся квазидвумерными спектрами изображений, расчёт значений занимает достаточно много времени.

Этого недостатка можно избежать, приняв за оптимальные параметры значения, полученные в результате усреднения квантователей, полученных в результате обработки изображений из заранее подготовленного набора данных с различным количеством деталей на снимках.

В процессе кодирования информации целесообразным может оказаться хранение и передача не полной информации о составляющих сигнала, а об отличиях соседних значений сигналов. Подобный подход может быть реализован с помощью метода дифференциально-импульсной кодовой модуляции (ДИКМ) [7,8]. Квантованию в данном случае будут подвергаться не сами значения, а разности с предсказанными на предыдущем этапе кодирования, что позволит увеличить точность воспроизведения исходного сигнала по сравнению с квантованием исходных значений.

Получение оптимальных значений для ДИКМ минимизирует ошибку квантования и кодирования. Расчёт оптимальных значений кантователя может быть произведён с применением кантователя Ллойда-Макса, с той разницей, что в качестве квантуемых значений будут выступать разности значений исходного сигнала с предсказанными значениями.

Алгоритмы сжатия, использующие равномерное и оптимальное квантование квазидвумерного спектра, описаны в [4]. Однако отдельный интерес представляет исследование комбинации методов перехода к квазидвумерному спектральному представлению и ДИКМ, а также сравнение результатов с исследованными ранее методами квантования.

В данной работе предлагаются алгоритмы сжатия, выраженные последовательностью шагов.

Шаг 1. Исходное изображение размером 512x512 разделяется на блоки. Размер блока варьируется от 2x2 до 256x256.

Шаг 2. Для каждого блока вычисляется квазидвумерный спектр. Для исходного сигнала $X_n$ формула вычисления спектра будет выглядеть следующим образом (1):

$$F_u^x = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1} X_n \cdot (-1)^{<n,r(u)>}, \quad (1)$$

где $<n,r(u)>=\sum_{i=0}^{n-1} r_i(u)\cdot n, u = \log_2 N$,

$N$ – число строк и столбцов изображения, являющееся степенью числа 2. В различных случаях получение квазидвумерного спектра может быть выполнено в виде эффективного матричного умножения, либо с помощью быстрого алгоритма.

Шаг 3.

*А.* Равномерное квантование значений квазидвумерного спектра на заданное число уровней от 2 (1 бит на составляющую спектра) до 512 (9 бит на составляющую спектра).

*Б.* Квантование значений спектра с минимизацией ошибки квантования методом Ллойда-Макса.

Пусть $x$ – значение сигнала, а $x_q$ – значение квантованного сигнала. Тогда $\varepsilon = x - x_q$ – ошибка квантования. То есть оптимальным будет кантователь, минимизирующий среднеквадратическую ошибку (2).

$$E(\varepsilon^2) = E((x-x_q)^2) = \min_{L_i, D_i}, \quad (2)$$

где $L_i$ – значения порогов, $D_i$ – значения расстояний между уровнями.

Квантователь, минимизирующий среднеквадратическую ошибку, известен как квантователь Ллойда-Макса [6].

*В.* Дифференциально-импульсное кодирование спектров с подбором оптимальных квантователей.

Шаг 4. Сжатие матрицы уровней методами энтропийного кодирования. В данной работе для сжатия был выбран алгоритм Deflate[9]. Данный алгоритм является комбинацией метода Хаффмана и алгоритма LZ77.

Шаг 5. Интерполяция значений на границах блока по ближайшему соседу при восстановлении изображения. Данный подход применяется в случае равномерного квантования на границах блока, так как из-за высокой неоптимизированной ошибки квантования постоянная составляющая будет восстановлена не точно, что может стать причиной появления белых полос на восстановленном изображении на границах блока.

При расчёте оптимальных значений данный шаг рекомендуется пропустить, так как низкая ошибка квантования позволяет довольно точно восстанавливать значения спектра, в том числе и постоянные составляющие.

Шаг 6. Замер степени сжатия. В качестве меры оценки степени сжатия был выбран коэффициент сжатия $C_R = n_1 / n_2$, где $n_1$ – число элементов носителей информации (например, бит или байт) исходного

набора данных, $n_2$ – число элементов носителей информации конечного набора данных.

Шаг 7. Замер СКО. Оценка визуального качества восстановленных изображений производилась с помощью расчёта среднего квадратического отклонения (*СКО, RMSE – Root Mean Square Error*) $\sigma$, представляющая собой попиксельное сравнение двух фрагментов изображения:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N \times M} \sum_{i=0}^{N} \sum_{j=0}^{M} (\mathbf{I}(i,j) - \hat{\mathbf{I}}(i,j))^2}$$

где $N \times M$ – размер изображения, $i = \overline{0,N}, j = \overline{0,M}$; $\mathbf{I}(i,j)$ – пиксель исходного изображение; $\hat{\mathbf{I}}(i,j)$ – пиксель восстановленного изображения.

**Результаты.** Целью экспериментальных исследований является определение места алгоритма сжатия с ДИКМ среди разработанных ранее алгоритмов с равномерным и оптимальным квантованием [4].

Исходные данные представлены набором ландшафтных изображений городской, сельской, лесной местности. Для проведения эксперимента было взято 58 изображений.

Пример типичного изображения из набора представлен на рисунке 1. Улучшение качества визуального восприятия в случае применения интерполяции показано на рисунке 2.



*Рисунок 1 – Пример исходного изображения городской застройки*



*а)* *б)*

*Рисунок 2 – Влияние интерполяции по ближайшему соседу при равномерном квантовании (размер блока 32x32, 32 уровня квантования, степень сжатия – 6,7 раз) а) СКО без интерполяции – 27,74, б)СКО с интерполяцией – 13,55*

В таблицах 1-3 представлены средние значения результатов обработки изображений. Показана зависимость СКО (в верхней части ячеек таблицы) и степени сжатия (в нижней части ячеек таблицы) от размера блока и количества уровней квантования.

Серым цветом в таблицах выделены значения уровней и блоков, не подходящие по визуальному критерию (и имеющие слишком высокое СКО).

*Таблица 1 – СКО и степень сжатия при равномерном квантовании*

| Размер блока / Число уровней | | 2 | 4 | 8 | 16 | 32 | 64 | 128 | 256 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2 | СКО | 96 | 96 | 96 | 96 | 96 | 96 | 96 | 96 |
| | Ст. сжатия | 6324 | 6324 | 6331 | 6329 | 6327 | 6329 | 6329 | 6329 |
| 4 | | 36,20 | 35,00 | 34,00 | 32,58 | 33,86 | 32,67 | 31,20 | 29,73 |
| | | 113,1 | 205,2 | 310,7 | 380,8 | 416,1 | 533,8 | 759,8 | 870,0 |
| 8 | | 21,80 | 22,28 | 23,38 | 24,25 | 27,39 | 29,22 | 38,01 | 43,88 |
| | | 24,00 | 31,91 | 45,38 | 68,79 | 84,55 | 125,71 | 137,44 | 149,45 |
| 16 | | 14,89 | 13,89 | 15,00 | 17,10 | 19,81 | 23,81 | 26,92 | 29,50 |
| | | 10,18 | 11,71 | 13,49 | 15,36 | 20,51 | 25,42 | 37,90 | 49,59 |
| 32 | | 13,06 | 10,21 | 9,23 | 9,98 | 11,26 | 12,86 | 15,89 | 19,27 |
| | | 5,06 | 5,82 | 6,41 | 6,85 | 8,06 | 10,30 | 12,73 | 16,14 |
| 64 | | 12,48 | 9,14 | 7,14 | 6,33 | 6,45 | 7,15 | 8,55 | 10,64 |
| | | 2,95 | 3,17 | 3,45 | 3,82 | 4,27 | 4,95 | 5,61 | 6,36 |
| 128 | | 12,34 | 8,79 | 6,39 | 4,92 | 4,19 | 4,08 | 4,56 | 5,39 |
| | | 1,91 | 2,04 | 2,20 | 2,44 | 2,67 | 2,94 | 3,20 | 3,51 |
| 256 | | 12,30 | 8,70 | 6,18 | 4,49 | 3,39 | 2,80 | 2,67 | 2,88 |
| | | 1,35 | 1,44 | 1,55 | 1,68 | 1,81 | 1,93 | 2,07 | 2,23 |

*Таблица 2 – СКО и степень сжатия при оптимальном квантовании*

| Размер блока / Число уровней | | 2 | 4 | 8 | 16 | 32 | 64 | 128 | 256 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2 | СКО | 27,43 | 27,76 | 28,11 | 28,26 | 28,33 | 28,36 | 28,40 | 28,44 |
| | Ст. сжатия | 537,6 | 1310,4 | 2200,3 | 2676,2 | 2706,8 | 2438,1 | 2154,0 | 1804,2 |
| 4 | | 27,43 | 27,76 | 28,11 | 28,26 | 28,33 | 28,36 | 28,40 | 28,44 |
| | | 44,86 | 61,28 | 68,13 | 83,86 | 83,74 | 62,68 | 59,69 | 102,44 |
| 8 | | 13,74 | 12,72 | 12,29 | 12,35 | 12,76 | 13,18 | 13,65 | 14,00 |
| | | 13,75 | 14,74 | 14,41 | 14,77 | 14,38 | 14,43 | 14,51 | 16,13 |
| 16 | | 12,81 | 10,10 | 8,50 | 7,82 | 7,67 | 7,71 | 7,72 | 7,67 |
| | | 6,64 | 6,45 | 6,18 | 6,30 | 6,57 | 6,62 | 6,58 | 6,38 |
| 32 | | 12,49 | 9,17 | 6,94 | 5,61 | 4,89 | 4,56 | 4,34 | 4,17 |
| | | 4,04 | 3,75 | 3,59 | 3,68 | 3,75 | 3,79 | 3,73 | 3,67 |
| 64 | | 12,34 | 8,85 | 6,41 | 4,78 | 3,73 | 3,13 | 2,83 | 2,74 |
| | | 2,77 | 2,63 | 2,53 | 2,54 | 2,56 | 2,57 | 2,56 | 2,57 |
| 128 | | 12,27 | 8,74 | 6,25 | 4,54 | 3,37 | 2,64 | 2,27 | 2,13 |
| | | 1,89 | 1,97 | 1,98 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,02 | 2,03 |
| 256 | | 12,26 | 8,69 | 6,17 | 4,44 | 3,25 | 2,44 | 1,96 | 1,72 |
| | | 1,34 | 1,44 | 1,53 | 1,63 | 1,65 | 1,65 | 1,64 | 1,65 |

*Таблица 3 – СКО и степень сжатия при ДИКМ*

| Размер блока / Число уровней | | 2 | 4 | 8 | 16 | 32 | 64 | 128 | 256 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2 | СКО | 18,13 | 19,93 | 21,61 | 23,01 | 24,23 | 25,28 | 26,19 | 26,96 |
| | Ст. сжатия | 145,0 | 254,0 | 436,1 | 656,5 | 842,9 | 974,3 | 1171,9 | 1685,6 |
| 4 | | 12,42 | 14,35 | 15,63 | 16,75 | 17,97 | 18,91 | 19,90 | 20,74 |
| | | 32,16 | 31,34 | 27,99 | 32,65 | 34,38 | 30,75 | 35,41 | 40,87 |
| 8 | | 7,54 | 8,81 | 9,99 | 11,04 | 11,88 | 12,52 | 13,11 | 13,80 |
| | | 12,65 | 13,53 | 13,31 | 14,27 | 13,92 | 13,70 | 14,16 | 15,99 |
| 16 | | 4,38 | 5,07 | 5,67 | 6,30 | 6,83 | 7,26 | 7,51 | 7,64 |
| | | 6,30 | 6,15 | 5,94 | 6,20 | 6,42 | 6,57 | 6,55 | 6,43 |
| 32 | | 2,55 | 2,91 | 3,20 | 3,49 | 3,75 | 3,97 | 3,99 | 3,95 |
| | | 3,76 | 3,55 | 3,47 | 3,60 | 3,69 | 3,76 | 3,71 | 3,65 |
| 64 | | 1,56 | 1,74 | 1,89 | 1,98 | 2,07 | 2,16 | 2,19 | 2,29 |
| | | 2,55 | 2,42 | 2,40 | 2,45 | 2,47 | 2,50 | 2,46 | 2,48 |
| 128 | | 0,91 | 1,05 | 1,18 | 1,23 | 1,28 | 1,36 | 1,52 | 1,70 |
| | | 1,82 | 1,82 | 1,86 | 1,88 | 1,89 | 1,90 | 1,93 | 1,98 |
| 256 | | 0,54 | 0,67 | 0,82 | 0,89 | 0,90 | 0,96 | 1,07 | 1,20 |
| | | 1,33 | 1,41 | 1,49 | 1,54 | 1,53 | 1,54 | 1,56 | 1,59 |

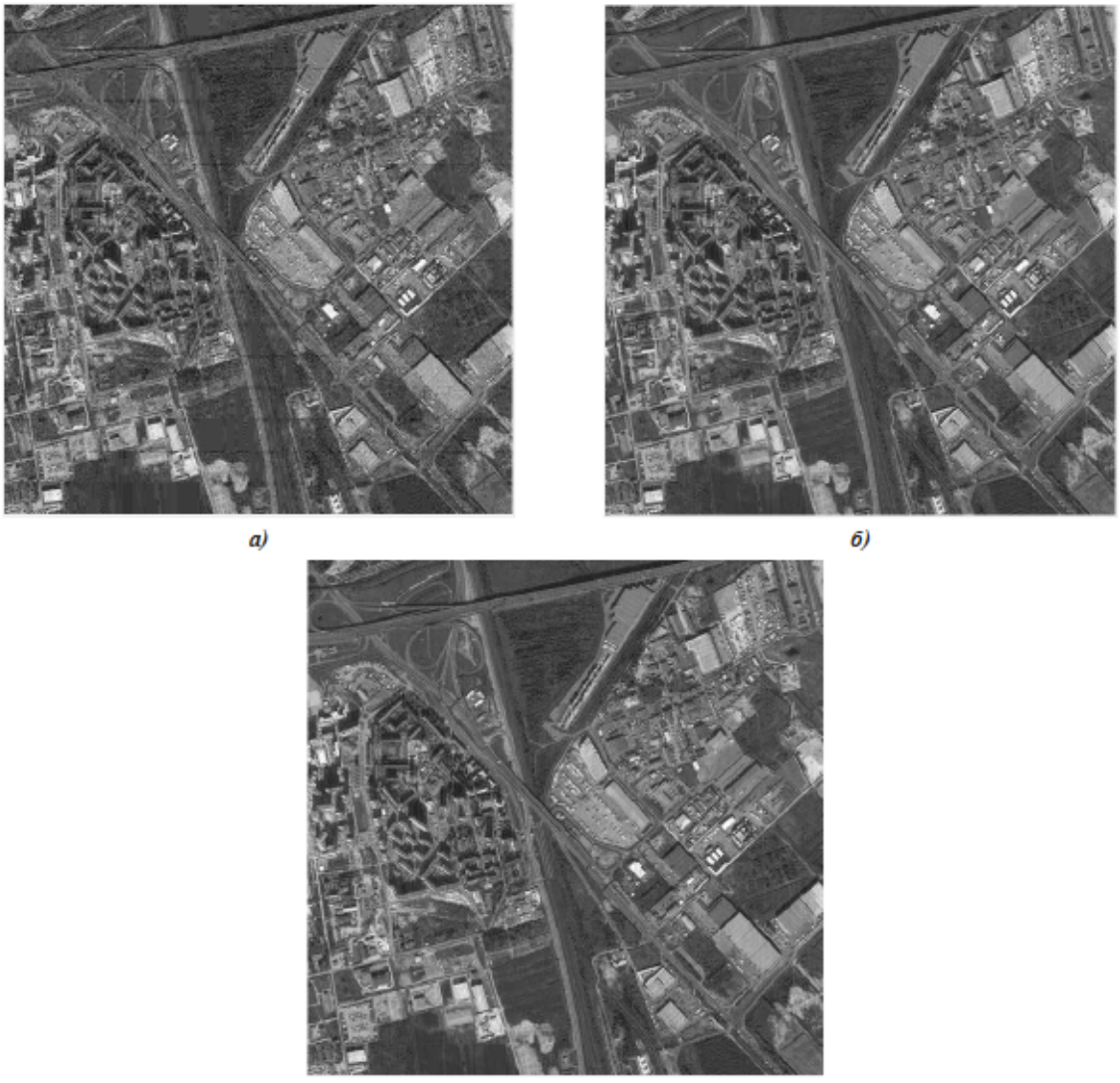
Значения, выделенные серым цветом, имеют высокое СКО и являются неприемлемыми с точки зрения визуального критерия.

Оранжевым цветом обозначены значения, имеющие низкие показатели степени сжатия, до 2 раз.

Синим цветом отмечены значения, которые не целесообразно использовать с точки зрения производительности и универсальности алгоритмов. То есть, при размерах блоков 2x2 и 4x4 процедура получения спектров становится трудозатратой. При размерах блока 64x64 и далее возможности алгоритмов по обработке изображений разных размеров, в том числе и популярных форматов, существенно сужаются.

Значения, удовлетворяющие визуальному критерию, имеющие приемлемую степень сжатия и размеры блока выделены белым цветом.

На рисунке 7 показаны изображения, восстановленные после сжатия с применением различных методов квантования.



*а)* *б)* *в)*

*Рисунок 7 – Изображения, восстановленные после сжатия с применением различных методов квантования, размер блока 32x32, 32 уровня квантования; а) Равномерное квантование – СКО – 13,5, степень сжатия – 6,69; б) Оптимальное квантование – СКО – 6.3, степень сжатия – 3.5; в) ДИКМ с оптимальным квантованием – СКО – 4,95, степень сжатия – 3,46*

Для обеспечения приемлемой производительности и получения выгоды с точки зрения универсальности обработки изображений разных размеров целесообразно использовать размеры блока от 8 до 64, количество уровней – от 16 до 64.

**Обсуждение.** Задача сжатия изображений может иметь в качестве основных характеристик различные показатели, такие как степень сжатия, качество восстановленных изображений, время или вычислительная сложность сжатия и восстановления, симметричность алгоритмов.

Для достижения высоких показателей сжатия изображений разработаны методы фрактального [10] и субполосного[11] сжатия изображений,

однако среди основных недостатков данных методов выделяют высокую вычислительную сложность и время работы алгоритмов, а также низкое качество восстановленных изображений при экстремально высоких степенях сжатия.

В [12] в экспериментальной части время перехода к спектральному преобразованию и обратно при использовании комбинированных методов вейвлет-преобразований и фрактальной теории в системе Matlab варьируются от 0,6 до 4 секунд, тогда как переход к квазидвумерному спектральному представлению в базисе функций Уолша занимает от 0,001 до 0,07 секунд при размерах блоков от 8x8 до 32x32.

Дополнительно для оценки характеристик сжатия использовалась база данных монохромных изображений TAMPERE17 [13]. Результаты для размеров блоков от 8x8 до 64x64 при уровнях квантования от 16 до 64 для сжатия с применением ДИКМ оказались сопоставимыми с данными, полученными на наборе данных, использовавшемся в ходе оригинального эксперимента (СКО до 9 ед., степень сжатия до 10 раз).

Для улучшения качества изображений возможно исследование различных вариантов интерполяции изображений [14]. Однако интерполяция по ближайшему соседу может рассматриваться как самый простой вариант интерполяции, не требующий реализации сложных вычислительных методов.

**Выводы.** На основе изложенного можно утверждать, что квазидвумерное представление сигналов в комбинации с методами блоковой обработки и квантования, а также ДИКМ, возможно применять в задачах сжатия изображений.

В работе также показано, что сочетание рассматриваемых подходов позволяет сжать изображение от 2 до 10 раз при приемлемом визуальном качестве.

Преимуществами методов квантования квазидвумерных спектров является достижение относительно высокой степени сжатия и скорости его выполнения при приемлемом визуальном качестве. Оптимальное квантование и ДИКМ с расчётом оптимальных значений ориентировано на качество восстановления.

Расчёт оптимальных значений квантования может привести к неприемлемым временным затратам, однако подобного эффекта можно избежать с помощью предварительного расчёта оптимальных квантователей для определённого вида сигналов, отличающихся специфическим распределением яркостей и деталей на снимках (например, ландшафтных изображений), что может в дальнейшем сделать вычислительные затраты оптимального квантования сопоставимыми с равномерным.

Представленные подходы к сжатию изображений могут найти применение в системах передачи данных, направленных на передачу изображений с высокой энергоэффективностью [15-17].

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Злобин В.К. Костров Б.В., Свирина А.Г. Спектральный анализ изображений в конечных базисах – М: М: КУРС: ИНФРА, 2016. – 171 с.

2. Светлов Г.В., Суменков Н.А, Костров Б.В., Фокина Н.С. Применение теории дискретных сигналов, опре-деленных на конечных интервалах, для обработки аэрокосмических изображений // Вестник Концерна ВКО Алмаз-Антей. 2017. №3 (22).

3. Baranchikov A. I., Babaev S. I., Sumenkov N.A., Zverev A.E., Bastrychkin A. S. The Issues of Orthogonal Basis Dimensi-on Selection in Embedded Image Processing Systems// 2021 10th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), Budva, Montenegro, 2021.

4. Bastrychkin A., Babaev S.I., Kostrov B.V., Grinchenko N.N. Image Compression Using Optimal Quantization // 2020 9th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), Budva, Montenegro, 2020.

5. Ахмед Н., Рао К.Р. Ортогональные преобразования при обработке цифровых сигналов. М: Связь, 1980. – 248 с.

6. Гонзалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений М: Техносфера, 2006. – 1072 с.

7. Kaban L., Gbaranwi B. A Comparative Analysis of Image Compression using PCM and DPCM // BT Technolo-gy Journal. 2021. – P. 60-67.

8. Дворкович В.П., Дворкович А.В. Цифровые видеоинформационные системы (теория и практика) М: Тех-носфера, 2018. – 1008 с.

9. Bakaev M., Goltsova E., Khvorostov V., Razumnikova O. Data Compression Algorithms in Analysis of UI Lay-outs Visual Complexity // Lecture Notes in Computer Science. – 2019. – Vol. 11964 LNCS. – P. 167-184.

10. Mendivil, Franklin & Stenflo, Örjan. Extreme compressi-on of grayscale images. //Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. – 2020. – Vol. 94. – DOI 10.1016/j.cnsns.2020.105546.

11. Разработка метода субполосного сжатия изображений / И.И. Лубков, Е.Г. Жиляков, Д.И. Трубицына, А.Н. Заливин // Экономика. Информатика. – 2022. – Т. 49, № 1. – С. 195-204. – DOI 10.52575/2687-0932-2022-49-1-195-204. – EDN AVNBJM.

12 Li, Xiangjun & Zhang, Shuili & Zhao, Haibo. A Fast Image Compression Algorithm Based on Wavelet Trans-form.// International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing. – 2021. – Vol.15. – P. 809-819. DOI 10.46300/9106.2021.15.89.

13. Ponomarenko, Mykola & Gapon, Nikolay & Voronin, Vi-acheslav & Egiazarian, Karen. Blind estimation of white Gaussian noise variance in highly textured images. Electronic Imaging. – 2018. – DOI 10.2352/ISSN.2470-1173.2018.13.IPAS-382.

14 D. Ahmed, Shaymaa & George, Loay & Dhannoon, Ban. The Use of Cubic Bezier Interpolation, Biorthogonal Wavelet and Quadtree Coding to Compress Color Images. British Journal of Applied Science & Technology. – 2015 – Vol.11. – P. 1-11. DOI 10.9734/BJAST/2015/20480.

15. Лисничук А.А., Батищев А.В. Двухкритериальный синтез OFDM-сигналов для повышения энергетиче-ской эффективности и помехоустойчивости // Вестник Рязанского государственного радиотехнического уни-верситета. – 2021. – № 76. – С. 3-16. – DOI 10.21667/1995-4565-2021-76-3-14.

16. Перепелкин Д.А., Сапрыкин А.Н., Иванчикова М.А., Косоруков С.С. Разработка программного инстру-ментария организации облачной видеоконференцсвязи // Вестник Рязанского государственного радиотехниче-ского университета. – 2020. – № 73. – С. 71-82. – DOI 10.21667/1995-4565-2020-73-71-82.

17. Никишин К.И. Моделирование процесса пере-дачи трафика в программно-конфигурируемых сетях // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2022. – № 81. – С. 32-41. – DOI 10.21667/1995-4565-2022-81-32-41.

*Статья поступила в редакцию 02.11.2024*
*Статья принята к публикации 13.12.2024*

УДК 681.518
EDN: YDDLCM

# НЕЙРОСЕТЕВАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРОМЕЖУТОЧНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В СИСТЕМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОДОГРЕВАТЕЛЕМ ГАЗА

© Автор(ы) 2024
SPIN: 3861-3756
AuthorID:1263636
ORCID: 0009-0002-5935-8034

**МОЛЧАНОВ Дмитрий Вадимович**, аспирант
*Саратовский государственный технический университет*
*(410054, Россия, Саратов, улица Политехническая, 77, e-mail: sstu_office@sstu.ru)*

**Аннотация.** Статья посвящена внедрению нейросетевой системы, основанной на многослойном персептроне, для контроля концентрации промежуточного теплоносителя в системе автоматического управления подогревателем газа. Эта технология позволяет оптимизировать процессы теплопередачи, что приводит к значительному повышению коэффициента полезного действия (КПД). Модель многослойного персептрона обрабатывает данные в реальном времени и динамически регулирует работу подогревателя, минимизируя энергопотери и повышая общую эффективность системы. Экспериментальные результаты демонстрируют превосходство предложенной технологии над традиционными методами, которые основывались на ручном отборе проб промежуточного теплоносителя, чреватом снижением КПД и даже выходом устройства из строя. Полученные в ходе экспериментов диаграмма рассеяния и график обучения модели подтверждают повышение КПД и способность системы быстро адаптироваться к изменению внешних условий без необходимости сложной перенастройки. Технология ориентирована на промышленные сферы, где критически важны точность и гибкость управления процессами нагрева газа. Оценены перспективы дальнейших исследований по внедрению нейросетевых технологий с промышленными системами автоматического управления подогревателями газа с промежуточным теплоносителем.

**Ключевые слова:** многослойный персептрон, нейронная сеть, подогреватель газа, промежуточный теплоноситель, пропиленгликоль, концентрация, автоматическое управление, коэффициент полезного действия, машинное обучение, температура, давление.

# NEURAL NETWORK SYSTEM FOR CONTROLLING THE INTERMEDIATE HEAT CARRIER CONCENTRATION OF THE AUTOMATIC GAS HEATER CONTROL SYSTEM

© The Author(s) 2024
**MOLCHANOV Dmitry Vadimovich,** postgraduate student
*Saratov State Technical University*
*(410054, Russia, Saratov, Polytechnic Street, 77, e-mail: sstu_office@sstu.ru)*

**Abstract.** The article is devoted to the implementation of a neural network system based on a multilayer perceptron for monitoring the concentration of an intermediate coolant in an automatic gas heater control system. This technology allows optimizing heat transfer processes, which leads to a significant increase in the efficiency. The multilayer perceptron model processes data in real time and dynamically regulates the heater operation, minimizing energy losses and increasing the overall efficiency of the system. The experimental results demonstrate the superiority of the proposed technology over traditional methods that were based on manual sampling of the intermediate coolant, which is fraught with a decrease in efficiency and even failure of the device. The scattering diagram and the model training schedule obtained during the experiments confirm the increase in efficiency and the ability of the system to quickly adapt to changing external conditions without the need for complex reconfiguration. The technology is focused on industrial areas where the accuracy and flexibility of gas heating process control are critical. The prospects for further research on the implementation of neural network technologies with industrial automatic control systems for gas heaters with an intermediate coolant are assessed.

**Keywords:** multilayer perceptron, neural network, gas heater, intermediate coolant, propylene glycol, concentration, automatic control, efficiency factor, machine learning, temperature, pressure.

*Для цитирования: Молчанов Д.В. Нейросетевая система контроля концентрации промежуточного теплоносителя в системе автоматического управления подогревателем газа / Д.В. Молчанов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 4(68). – С. 62-68. – EDN: YDDLCM.*

**Введение.** Управление концентрацией промежуточного теплоносителя в системах автоматического управления подогревателем газа необходимо для повышения коэффициента полезного действия (КПД) энергетических установок за счет снижения тепловых потерь. В последние годы нейросетевые технологии зарекомендовали себя как эффективный инструмент для оптимизации таких процессов.

Существует множество исследований, посвященных применению нейронных сетей в тепловых системах [1-5] на объектах промышленной теплоэнергетики и других отраслях, причем количество публикаций в данной области растет в геометрической прогрессии, что связано с национальной стратегией развития искусственного интеллекта до 2030 года. Текущие исследования сосредоточены на разработке систем, способных обрабатывать большие объемы данных и принимать решения в реальном времени. Выбор подходящей модели зависит от конкретной задачи, а также от типа данных и их объема.

Нейронные сети классифицируют по различным критериям, включая их архитектуру, тип решаемой задачи, способы обучения. Настоящая работа посвящена задаче мониторинга и анализа концентрации промежуточного теплоносителя в подогревателе газа, определяющей тепловые потери и, следовательно, коэффициент его полезного действия. Тепловые потери в подогревателе газа возникают из-за недостаточной теплоизоляции, конвекционных и радиационных процессов, неэффективного теплообмена, утечек газа, переходных режимов работы и неправильного распределения потоков. Для минимизации этих потерь необходимо улучшать материалы и конструкцию устройства, обеспечивать регулярное техническое обслуживание и использовать интеллектуальные системы управления для оптимизации нагревательных процессов, примеры таких исследований представлены в статьях [6-11]. Концентрация теплоносителя напрямую влияет на теплопередачу от горелочного устройства к жаровым трубам. В статье [6] рассматривается вопрос прогнозирования коэффициента теплопроводности с помощью нейронных сетей, построенных методом многослойного персептрона.

В подогревателях газа в качестве промежуточного теплоносителя часто используются жидкости, обладающие хорошими теплопроводными свойствами и устойчивостью к высоким температурам. Наиболее распространённые виды таких жидкостей включают пропиленгликоль, этиленгликоль, диэтиленгликоль, способы определения их концентрации описаны в статьях [12, 13]. Используя данные, представленные в статье [13], можно сделать вывод, что в качестве промежуточного теплоносителя целесообразно использовать пропиленгликоль, отличающийся от других гликолей высокой теплопроводностью. Кроме того, он является полностью безопасным для работы обслуживающего персонала, так как не ядовит и соответствует современным экологическим и промышленным стандартам. Использование пропиленгликоля позволяет также повысить долговечность оборудования за счет снижения коррозионных процессов в системе.

Цель данной статьи – оценка возможности применения нейронных сетей для мониторинга концентрации пропиленгликоля и других параметров в системе подогревателя газа, для чего рассматриваются существующие подходы к проектированию и внедрению интеллектуальных систем управления, а также их влияние на эффективность работы теплоэнергетических установок. Представлены результаты экспериментов по использованию многослойного персептрона для анализа данных о теплопередаче, выявлению отклонений в работе системы и прогнозированию ее производительности. Уделено внимание новым методам повышения эффективности систем подогрева газа, посредством интеграции передовых алгоритмов искусственного интеллекта, что способствует не только снижению затрат на эксплуатацию оборудования, но и развитию устойчивых энергетических технологий будущего.

**Методология.** *1.1 Основные факторы, влияющие на концентрацию промежуточного теплоносителя в подогревателях газа.* Концентрация промежуточного теплоносителя в подогревателях газа является важным параметром, от которого зависит эффективность и стабильность работы всей системы. На концентрацию влияет множество факторов, которые необходимо учитывать для поддержания оптимального режима работы всей системы. Одним из ключевых факторов является испарение теплоносителя с переходом в газообразное состояние при высоких температурах [14, 15]. Другим важным фактором является утечка теплоносителя из-за механических повреждений или износа уплотнений, при этом его концентрация уменьшается, и возникает опасность для окружающей среды. Для восстановления уровня жидкости после утечек или при проведении работ по техническому обслуживанию необходима доливка или замена теплоносителя, однако добавление свежего теплоносителя может изменить исходную концентрацию.

Значительное влияние на физические свойства и поведение теплоносителя оказывают температура окружающей среды и внутренняя температура системы, влияющие на свойства жидкости, что косвенно влияет на её концентрацию и эффективность теплопередачи [16]. К изменению химического состава теплоносителя иногда приводят химические реакции внутри системы, взаимодействие с материалами трубопроводов или примесями, вызывающее изменения структуры молекул, что также отражается на общей эффективности жидкости. Необходимо также учитывать возможное изменение свойств и концентрации теплоносителя ввиду случайного смешивания теплоносителей разного типа при техническом обслуживании установки [17, 18].

Кроме прочего эффективный объём рабочей жидкости может снижаться в результате осаждения и накопления осадков и загрязнения внутри системы, нарушающего баланс концентрации активных компонентов и снижающего производительность системы. Наконец, давление в системе сказывается на изменении растворимости газов в жидком теплоносителе, косвенно изменяя его концентрацию.

Понимание этих процессов позволяет разработать эффективные методы управления и контроля за состоянием системы, обеспечивая её надежную работу и долговечность.

*1.2 Архитектура нейронной сети на основе многослойного персептрона.* В качестве архитектуры нейронной сети для решения задачи контроля концентрации теплоносителя в системе автоматического управления подогревателем газа был выбран многослойный персептрон (*MLP – Multi-layered perceptron*) – тип искусственной нейронной сети, который состоит из нескольких слоев нейронов: входного, одного или более скрытых слоев и выходного слоя. Каждый нейрон в одном слое связан с каждым нейроном в следующем слое, что позволяет сети обучаться сложным зависимостям в данных. Данный метод является универсальным, способность *MLP* аппроксимировать любые непрерывные функции делает его идеальным инструментом для обработки сложных данных с множеством переменных и нелинейными зависимостями. В нашей системе, где необходимо учитывать не только концентрацию теплоносителя, но и такие параметры как температура и давление, такая гибкость является критически важной. Кроме того, *MLP* позволяет эффективно обрабатывать нелинейные зависимости между входными параметрами и выходной функцией, что показано в статьях [19-22]. Система контроля теплоносителя подразумевает решение задач, где линейные модели могут не справиться из-за ограничений в улавливании сложных взаимосвязей. Использование функций активации, таких как *ReLU* (*Rectified Linear Unit*) в скрытых слоях сети помогает лучше моделировать эти зависимости.

Функция *ReLU* определяется следующим образом [19]:

$$ReLU(x) = max(0, x). \quad (1)$$

Эффективность *MLP* проявляется при наличии достаточного количества данных для обучения. В нашем случае система подогревателя газа генерирует большой объем данных, который может быть использован для обучения модели. Это позволяет *MLP* выявлять скрытые закономерности без необходимости ручного выявления признаков, что экономит время и ресурсы.

Определение оптимального количества слоев и нейронов многослойного персептрона в задаче контроля концентрации промежуточного теплоносителя основывается на учете специфики задачи, объема данных и вычислительных ресурсов. Однако можно предложить некоторое начальное приближение на основе общих практик и характера проблемы.

Начнем с входного слоя. Здесь количество нейронов определяется числом параметров, которые следует учитывать в системе. КПД подогревателя газа зависит от следующих показателей: температура входящего газа, температура теплоносителя, площадь теплообмена, скорость потока газа, конструкция подогревателя, качество теплоизоляции, состояние оборудования, химический состав газа, рабочее давление, условие эксплуатации, концентрация промежуточного теплоносителя.

Переходя к скрытым слоям, важно помнить о балансе между сложностью модели и её способностью обобщать данные. Первый скрытый слой – это место, где сеть начинает «учиться» выделять базовые паттерны из данных. Обычно здесь необходимо большее количество нейронов, например, 64-128, чтобы получить как можно больше информации о взаимодействиях между входными параметрами. Однако одного слоя недостаточно для отображения полной картины. Второй скрытый слой помогает углубить модель и позволить ей изучать более сложные зависимости. Количество нейронов здесь может варьироваться в пределах 32-64, что позволяет сети постепенно концентрировать внимание на наиболее значимых особенностях данных.

Модель многослойного персептрона представлена на рисунке 1.

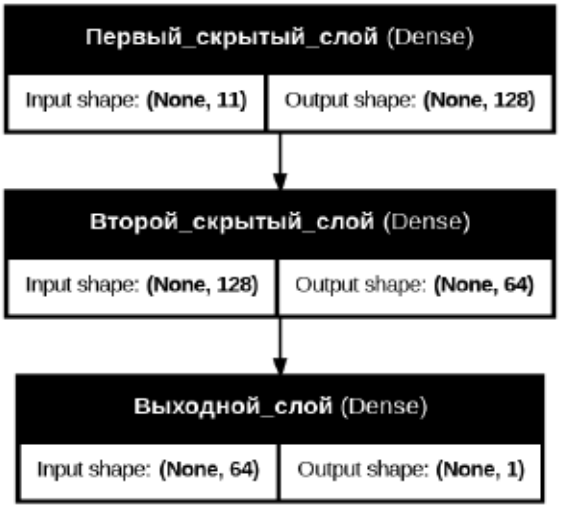



*Рисунок 1 – Модель многослойного персептрона с двумя скрытыми слоями*

*1.3 Обучение нейронной сети.* В данной программе обучение нейронной сети осуществляется на основе симуляции процесса предсказания эффективности (КПД) системы в зависимости от различных входных параметров, в том числе концентрации промежуточного теплоносителя. Нейронная сеть реализована с использованием библиотеки *Keras*, ее модель представляет собой многослойный перцептрон, состоящий из трех слоев. Первый скрытый слой содержит 128 нейронов, второй – 64 нейрона, оба используют функцию активации *ReLU*, позволяющую модели обучаться сложным нелинейным зависимостям между входными и выходными данными. Выходной слой состоит из одного нейрона, который предсказывает скалярное значение КПД.

Для обучения нейронной сети в реализуемой программе был выбран алгоритм оптимизации *Adam*. Данный алгоритм является одним из самых

популярных и широко используемых для обучения глубоких нейронных сетей это подтверждают исследования [23-27], он имеет ряд преимуществ:

– адаптивная скорость обучения – *Adam* автоматически адаптирует скорость обучения для каждого параметра модели, что способствует более эффективному обучению;

– комбинация методов, сочетающая достоинства двух других методов стохастической оптимизации – *AdaGrad* (адаптивная градиентная оптимизация) и *RMSProp* (коррекция дисперсии), эффективно работая с шумными или разреженными градиентами;

– моментум – *Adam* использует метод моментума для учета экспоненциально взвешенного среднего прошлых градиентов, что помогает ускорить процесс спуска и избежать локальных минимумов.

Основная идея *Adam* заключается в изменяющемся шаге оптимизации, выражающемся формулой

$$\Delta_t = \alpha\left(\frac{\overrightarrow{m_t}}{\sqrt{\overrightarrow{v_t}+\varepsilon}}\right), \quad (2)$$

где $\Delta_t$ – малый шаг, $\alpha$ – шаг оптимизации, $\frac{\overrightarrow{m_t}}{\sqrt{\overrightarrow{v_t}+\varepsilon}}$ – отношение неопределенности на данном шаге.

В данном случае начальная скорость обучения (*learning_rate*) была установлена на уровне 0.001, что является стандартным значением для многих задач при использовании *Adam*. Для реализации алгоритма оптимизации *Adam* в данной нейронной сети было использовано 10 эпох обучения. Это количество выбрано для достижения оптимального баланса между точностью модели и временем, затрачиваемым на обучение.

После обучения необходимо решить задачу прогнозирования КПД системы – по возможности точно предсказать эффективность на основе предоставленных входных данных по критерию среднеквадратичной ошибки (*MSE – Mean Squared Error*) – одной из основных показателей отклонения. Для каждой точки вычисляется квадрат отклонения, после чего полученные значения суммируются и делятся на общее количество точек. Чем ближе полученное значение к нулю, тем точнее будет модель. Данный метод расчёта чувствителен к промахам в выборке, или к выборкам с большим разбросом значений [28].

**Результаты.** Для обучения и тестирования нейронной сети были использованы данные с предполагаемых датчиков ряда параметров, в ходе эксперимента выбрано время работы подогревателя 24 часа, в течение этого времени он сначала работает в штатном режиме, а далее концентрация промежуточного теплоносителя изменяется. Для визуализации результатов моделирования данного процесса была использована библиотека *matplotlib.pyplot* для построения нескольких важных графиков, включая график изменения функции потерь во время обучения модели нейронной сети. График функции потерь позволяет оценить эффективность процесса обучения, демонстрируя как со временем (по мере увеличения числа эпох) изменяется ошибка между предсказанными моделью значениями и фактическим КПД подогревателя. На графике абсцисса представляет собой количество эпох, что соответствует числу итераций полного прохода по тренировочным данным, в то время как по ординате откладывается значение среднеквадратичной ошибки, которая является функцией потерь (рис. 2).

В дополнение к этому графику на рисунке 3 представлены зависимости от времени значений КПД (а) концентрации теплоносителя (б), все они дают полную картину о поведении обученной модели и её способности генерировать точные предсказания. Они позволяют оттенить сильные и слабые стороны метода и могут использоваться для последующего улучшения модели путем совершенствования архитектуры сети или метода обучения.

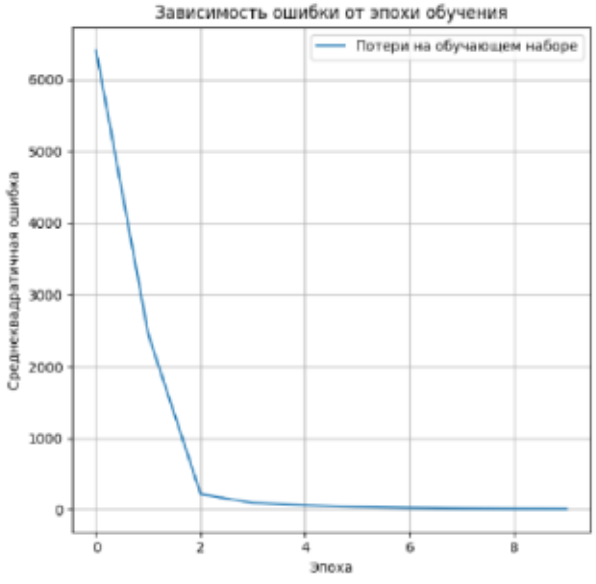
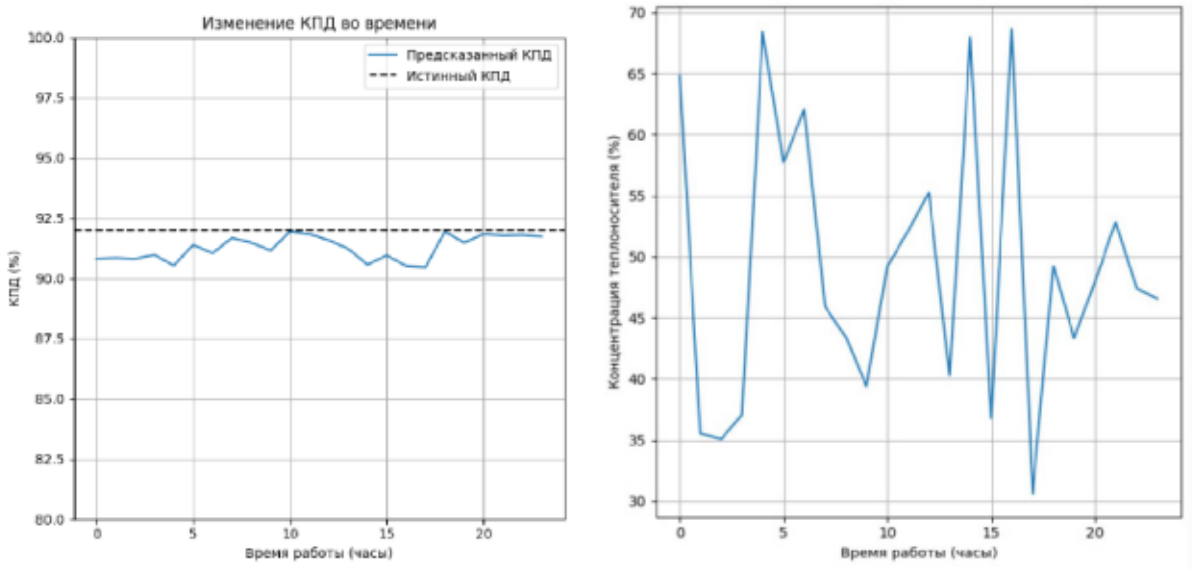



*Рисунок 2 – График функции потерь*




*а)* *б)*

*Рисунок 3 – Графики изменения со временем КПД (а) и концентрации промежуточного теплоносителя (б)*

**Обсуждение.** Создание и обучение нейронной сети для моделирования функционирования системы на основе различных параметров представляет собой сложную задачу, которая требует тщательного подхода к выбору архитектуры модели и анализа полученных данных. Разработана модель с использованием библиотеки *TensorFlow*, позволяющей прогнозировать коэффициент полезного действия с учетом множества входных параметров. Модель построена как последовательная нейронная сеть, состоящая из трех слоев: первого скрытого слоя с 128 нейронами, второго с 64 нейронами и выходного слоя, предсказывающего значение КПД. Для активации использовалась функция *ReLU*, учитывающая нелинейности в данных. Всего в сети оказалось 9857 обучаемых параметров, включая веса и смещения каждого слоя.

Проведено обучение модели на синтетических данных, где истинный КПД был зафиксирован на уровне 92%. Тренировочный набор включал 800 образцов, а тестирование производилось на данных за 24 часа. Этот подход дал возможность выявить базовые закономерности, исключив влияние шума реальных данных.

В ходе обучения было замечено устойчивое снижение среднеквадратичной ошибки, что свидетельствует об успешной адаптации модели к данным. Это отражается на графике потерь, где наблюдается значительное их уменьшение в течение первых эпох. Тем не менее, важно учитывать риск переобучения, когда модель излишне точно воспроизводит тренировочные данные в ущерб выявлению более общих закономерностей.

Из полученных графиков можно сделать вывод о том, что при вариациях концентрации промежуточного теплоносителя меняется предсказанное КПД подогревателя. Это объясняется тем, что при концентрации промежуточного теплоносителя равной 50% достигается наибольший коэффициент теплопередачи, чем больше отклонение от данного значения, тем больше снижается КПД подогревателя, так как ему приходится затрачивать больше ресурсов и времени для нагрева жаровых труб.

Полученные результаты свидетельствуют о потенциале использования нейронных сетей для анализа эффективности систем. Однако следует уделить внимание анализу чувствительности модели к изменениям входных параметров, это позволит лучше понять ее поведение в различных условиях эксплуатации системы и повысит надежность прогнозов.

В процессе дальнейших исследований нейросетевой системы контроля концентрации промежуточного теплоносителя одним из перспективных направлений развития представляется использование предложенной системы для регулирования подачи давления газа на горелку. Высокая точность контроля концентрации теплоносителя позволяет непрерывно регулировать давление газа в зависимости от текущих параметров и прогнозируемых изменений в системе, что позволит улучшить эффективность теплопередачи и снизить энергетические затраты. В частности, инновационный способ регулирования давления в подогревателях газа с помощью турбодетандерной установки [29, 30] применение результатов настоящего исследования дает возможность добиться оптимальных параметров в процессе управления давлением подаваемого на горелки газа и преобразования механической энергии газа в электрические сигналы.

Данное исследование показывает путь прогнозирования аварийных ситуаций, которая может стать основой для новой стратегии управления рисками. Создание предиктивного модуля анализа данных

позволит не только заранее выявлять потенциальные риски аварий, но и своевременно реагировать на малейшие отклонения от нормы, предотвращая тем самым серьезные нарушения работы, к которым может относиться образование коррозии, неэффективный теплообмен и пр.

**Выводы.** Применение современных подходов машинного обучения, в частности глубоких нейронных сетей, позволяет создать интеллектуальную систему, способную анализировать большое количество входных данных и принимать решения на основе сложных взаимосвязей между параметрами системы. Построенная модель интегрирует данные о температуре, давлении и концентрации теплоносителя, чтобы обеспечить оптимальные режимы работы подогревателя. Ключевой аспект работы состоит в использовании адаптивных алгоритмов, которые не только обучаются на исторических данных, но и способны корректироваться в реальном времени с учетом изменяющихся условий эксплуатации. Такой подход обеспечивает высокую точность предсказаний и быструю реакцию на изменения в технологическом процессе. Практическая реализация этой системы может быть адаптирована к другим промышленным применениям, где требуется управление процессами с участием теплообменников или аналогичных устройств. Внедрение подобных решений открывает новые возможности для повышения энергетической эффективности предприятий нефтегазовой и химической индустрии.

Несмотря на достигнутые результаты, остается ряд вопросов для дальнейшего изучения. Например, необходима более глубокая оценка влияния внешних факторов (таких как климатические условия и т.д.) на эффективность работы системы. Также стоит рассмотреть возможность интеграции других методов искусственного интеллекта для расширения функциональных возможностей системы. Разработка нейросетевых систем контроля открывает новые горизонты в управлении теплотехническими объектами, позволяя значительно повысить их КПД при одновременном сокращении затрат энергии.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Мостовенко Л.В., Белоглазов В.П. Анализ эффективности внедрения нейронных сетей на объектах промышленной теплоэнергетики // Актуальные проблемы науки и образования в условиях современных вызовов. – 2022. – С. 266-277.

2. Khalyasmaa, I.A. The analysis of efficiency of artificial intelligence methods application for an assessment of feasibility of scientific and technical decisions / I.A. Khalyasmaa, S.A. Eroshenko // Proceedings of 2017 20th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements. – 2017. – P. 883-886.

3. Khalyasmaa A.I., Zinovieva E.L., Eroshenko, S.A. Performance analysis of scientific and technical solutions evaluation based on machine learning. In // Proceedings – 2020 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology. – 2020. – P. 475-478.

4. Avetisyan B.R., Druzhinina N.S., Daudov, I.M. Neural networks and artificial intelligence as trends for the development of the future // J Phys Conf, 1582. 2020. 012005.

5. Панов М., Хмелев И., Смирнов А. Нейронные сети на службе энергетиков // Открытые системы. СУБД №4. – 2016. – С. 39-40.

6. Григорьев Б.А., Александров И.С., Герасимов А.А. Прогнозирование коэффициента теплопроводности сложных углеводородных смесей с помощью искусственных нейронных сетей // Научно-технический сборник "Вести газовой науки". – 2017. – № 2 (30). – С. 32-38.

7. Янчук В.М., Шишкин И.В., Шкулов С.А., Федотов Д.В., Кузьбожев П.А., Сальников А.В. Определение тепловых потерь подогревателя газа газораспределительной станции с промежуточным теплоносителем // Научно-технический сборник Вести газовой науки. – 2020. – № S1. – С. 93-97.

8. Янчук В.М., Кузьбожев А.С., Бирилло И.Н., Шишкин И.В., Кузьбожев П.А., Шкулов С.А. Совершенствование методологии оценки тепловых потерь подогревателей газа на ГРС // Ухтинский государственный технический университет. – 2021. – С. 152-154.

9. Горбаченко В.И., Довженко А.Ю. Решение на нейронной сети уравнения теплопроводности с нелинейным источником // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2007. – С. 24-32.

10. Самокиш А.В. Моделирование процесса теплопроводности с применением нейронной сети в системе MATLAB // Концептуальные подходы к образованию в современной эпохе: отечественный и зарубежный опыт: Материалы XXV Всероссийской научно-практической конференции, Ростов-на-Дону. 2020. – С. 40-47.

11. Bobzin K., Lugscheider E., Nickel R. Modeling and Simulation in the Production Process Control and Material Property Calculation of Complex Structured EB-PVD TBCs // Computational Materials Science. 2007. – P. 600-610.

12. Молчанов Д.В., Игнатьев А.А. Структурный анализ и принцип работы интеллектуального погружного ареометра, и возможность его интеграции в систему автоматического управления подогревателем газа // Матрица научного познания. – 2023. – С. 70-74.

13. Молчанов Д.В. Внедрение интеллектуального погружного рефрактометра в систему автоматического управления подогревателя газа // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2023. – С. 21-30.

14. Шит Б.М. Моделирование регулируемого контура промежуточного теплоносителя теплонасосной установки (часть I) // Проблемы региональной энергетики. – 2009. – С. 1-13.

15. Шит М.Л., Андронатий Н.Р., Шит Б.М. Моделирование регулируемого контура промежуточного теплоносителя теплонасосной установки (часть II) // Проблемы региональной энергетики. – 2011. – С. 66-73.

16. Зарипова Р.С., Самаркина Е.В., Петрова А.Н. Мониторинг влияния температуры водной среды на измерение ионной концентрации с применением мембранных технологий в системах теплоснабжения // Вода: химия и экология. – 2023. – С. 15-19.

17. Хворостян П.В. Особенности применения различных видов теплоносителя в подогревателях газа с промежуточным теплоносителем // Вестник Газпроммаша выпуск 2 URL: https://www.gazprommash.ru/factory/vestnik/vestnik2/vestnik2_st11/ (дата обращения 1.10.2024).

18. Shahsavar A., Saghafian M., Salimpour M.R., Shafii M.B. Effect of temperature and concentration on thermal conductivity and viscosity of ferrofluid loaded with carbon nanotubes // Heat Mass Transfer 52. – 2016. – P. 2293-2301

19. Федоров И.Е., ГААР М.П., Гарифулин А.Е. Анализ и применение RELU функций активации и их производных функций // Вестник новой эры. – 2024. – С. 204-217.

20. Пензина Е.К. Сравнительный анализ многослойного и нечеткого многослойного персептронов при решении задачи классификации // Молодежный научный форум сборник статей по материалам XLVII студенческой международной научно-практической конференции. – Том 17. – 2019. – С. 38-43.

21. Anil K.J., Jianchang M., Mohiuddin K.M. Artificial Neural Networks // A Tutorial IEEE Computer, Vol. 29, No. 3. – 1996. – P. 31-44.

22. Первое знакомство с полносвязными нейросетями // Яндекс образование. Учебник по машинному обучению URL:

https://education.yandex.ru/handbook/ml/article/pervoe-znakomstvo-s-polnosvyaznymi-nejrosetyami/ (дата обращения 5.10.2024).

23. Березин А.Ю. Алгоритм ADAM – современный метод оптимизации для решения задач машинного обучения // Некоторые вопросы анализа, алгебры, геометрии и математического образования. – 2021. – С.63-64.

24. Yang G., Yang J., Li S. Modified CNN algorithm based on Dropout and ADAM optimizer // Huazhong Keji Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban), Vol. 46, No. 7. – 2018. – P. 122-127.

25. Kim, K.S., Choi, Y.S. Hyadamc: A new adam-based hybrid optimization algorithm for convolution neural networks // Sensors. 2021. – 21. – 4054.

26. Liu M., Yao D., Liu ZH., GUO J., CHEN J. An Improved Adam Optimization Algorithm Combining Adaptive Coefficients and Composite Gradients Based on Randomized Block Coordinate Descent // Computational Intelligence and Neuroscience. – 2023. – P. 4765891.

27. Reyad, M., Sarhan A.M., Arafa M. A modified adam algorithm for deep neural network optimization // neural computing applications. – 2023. – P. 17095-17112.

28. Выбор функции потерь для задач построения нейронных сетей // NTA URL: https://newtechaudit.ru/vybor-funkczii-poter-dlya-zadach-postroeniya-nejronnyh-setej/ (дата обращения 2.10.2024).

29. Молчанов Д.В., Игнатьев А.А. Инновационная модель питания системы автоматического управления подогревателем газа // Матрица научного познания. – 2023. – С. 158-163.

30. Молчанов Д.В. Турбодетандер в системе автоматического регулирования газа // Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. Сборник научных трудов. «Автоматизация и управление в машино и приборостроении». – 2024. – С.63-72.

*Статья поступила в редакцию 27.10.2024*
*Статья принята к публикации 13.12.2024*

УДК 372.881.1
EDN: ECAMBY

# АДАПТИВНЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ОБУЧЕНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ: НАПРАВЛЕННАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ДАННЫХ ДЛЯ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА

© Автор(ы) 2024

SPIN: 4006-5790
AuthorID: 1153489
ORCID: 0000-0002-1145-277X
ScopusID: 57245014800

**РОЗАНОВ Иван Александрович**, преподаватель-исследователь,
программист НИЧ НУК ИУ МГТУ им. Н.Э. Баумана
*Московский государственный университет имени Н.Э. Баумана*
*(105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1, e-mail: ivanr@rovenda.ru)*

SPIN: 1754-5370
AuthorID: 905909
ORCID: 0000-0002-5204-7551
ScopusID: 14042928000

**СОТНИКОВ Алексей Александрович**, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Компьютерные системы и сети»
*Московский государственный университет имени Н.Э. Баумана*
*(105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1, e-mail: sotnikov@bmstu.ru)*

SPIN: 5243-9323
AuthorID: 984188
ORCID: 0000-0002-0770-8218
ScopusID: 58490329000

**КИМ Тамара Александровна**, преподаватель-исследователь,
инженер НИЧ НУК ИУ МГТУ им. Н.Э. Баумана
*Московский государственный университет имени Н.Э. Баумана*
*(105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1, e-mail: kimta@bmstu.ru)*

**Аннотация.** В течение последних лет растет интерес к использованию гибридных систем искусственного интеллекта при анализе комплексных многомерных данных, в частности, гидроакустических сигналов. Такие системы, совмещающие функционал нейронных сетей и математического моделирования, обладают большим потенциалом для решения задач кластерного анализа и моделирования в целом. Однако у многих существующих решений возникают проблемы с устойчивостью и работоспособностью в режиме реального времени. Целью настоящего исследования является преодоление этих недостатков путем применения новых методов, объединяющих адаптивное управление скоростью обучения на основе таких оптимизационных алгоритмов, как AdaGrad, RMSprop и Adam, а также метрик производительности математической модели на базе различных сценариев обучения. В рамках исследования были проведены эксперименты, оценивающие эффективность комбинаций предложенных методов в условиях различной реверберации гидроакустических сигналов. Полученные результаты показывают, что предложенные подходы существенно повышают точность и устойчивость гибридных систем имитации данных с искусственным интеллектом, особенно в сложно моделируемых математически акустических средах. Реализация систем мониторинга показателей производительности и сценариев управления в свою очередь дает лучшее представление о поведении модели и позволяет адаптироваться к различным условиям эксплуатации. Полученные результаты исследования подчеркивают важность интеграции адаптивных методов управления обучением в гибридные технологии нечетких вычислений с классическими математическими методами моделирования с целью повышения точности анализа неоднородной многомерной информации. Предложенные методы позволяют расширить возможности приложений имитационного моделирования в реальном времени, обеспечивая повышенную надежность и точность работы, что имеет ключевое значение для приложений, требующих оперативной обработки данных.

**Ключевые слова:** адаптивное машинное обучение, гибридные системы, гидроакустические сигналы, кластерный анализ, нейронные сети, обработка данных в реальном времени, эффективная скорость обучения.

# ADAPTIVE METHODS OF NEURAL NETWORK TRAINING MANAGEMENT: GUIDED DATA GENERATION FOR CLUSTER ANALYSIS

© The Author(s) 2024

**ROZANOV Ivan Aleksandrovich,** researcher-lecturer, programmer of scientific and educational complex
*Bauman Moscow State Technical University*
*(105005, Russia, Moscow, 2nd Baumanskaya St., bld. 5, str. 1, e-mail: ivanr@rovenda.ru)*
**SOTNIKOV Aleksei Aleksandrovich,** Ph.D. in Engineering,

associate professor of the "Computer Systems and Networks" Department
*Bauman Moscow State Technical University*
*(105005, Russia, Moscow, 2nd Baumanskaya St., bld. 5, str. 1, e-mail: sotnikov@bmstu.ru)*
**KIM Tamara Aleksandrovna,** researcher-lecturer, engineer of scientific and educational complex
*Bauman Moscow State Technical University*
*(105005, Russia, Moscow, 2nd Baumanskaya St., bld. 5, str. 1, e-mail: kimta@bmstu.ru)*

**Abstract.** Recently there has been a growing interest in the use of hybrid artificial intelligence systems in the analysis of complex multidimensional data, in particular, hydroacoustic signals. Such systems, combining the functionality of neural networks and mathematical modeling, have great potential for solving problems of cluster analysis and modeling in general. However, many existing solutions have problems with stability and real-time performance. The aim of this study is to overcome these shortcomings by applying new methods that combine adaptive learning rate control based on optimization algorithms such as AdaGrad, RMSprop and Adam, and mathematical model performance metrics based on different learning scenarios. As part of the study, experiments were conducted to evaluate the performance of combinations of the proposed methods under different reverberation conditions of hydroacoustic signals. The results show that the proposed approaches significantly improve the accuracy and robustness of hybrid data simulation systems with artificial intelligence, especially in complex mathematically modeled acoustic environments. The implementation of monitoring systems for performance metrics and control scenarios in turn provides a better understanding of the model behavior and allows for adaptation to different operating conditions. The obtained research results emphasize the importance of integrating adaptive learning control methods in hybrid fuzzy computing technologies with classical mathematical methods of simulation in order to improve the accuracy of analysis of heterogeneous multidimensional information. The proposed methods enhance the capabilities of real-time simulation applications by providing improved reliability and accuracy of performance, which is of key importance for applications requiring fast data processing.

**Keywords:** adaptive machine learning, hybrid systems, hydroacoustic signals, cluster analysis, neural networks, real-time data processing, efficient learning rate.

*Для цитирования: Розанов И.А. Адаптивные методы управления обучением нейронных сетей: направленная генерация данных для кластерного анализа / И.А. Розанов, А.А. Сотников, Т.А. Ким // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 4(68). – С. 69-75. – EDN: ECAMBY.*

**Введение.** В последнее время в научной и производственной сферах значительно возрос интерес к разработке и использованию методов распознавания образов и кластерного анализа в контексте систематизации разнородных данных. Такие методы искусственного интеллекта, как нейронные сети и алгоритмы нечетких вычислений, находят широкое применение в обработке многомерных данных, в частности, гидроакустических сигналов. Ряд современных исследовательских и практических работ [1-5] показывает, что гибридные системы искусственного интеллекта, в которых возможности нейросетевых подходов соединяются с адаптивными алгоритмами обработки данных, способны значительно улучшить точность и повысить эффективность кластерного анализа.

Практические реализации подобных подходов ставят перед разработчиками задачи, некоторые аспекты которых все еще принципиально не решены. К таким проблемам, требующим дальнейшего углубленного изучения, относится адаптивное управление процессом обучения нейронных сетей в условиях изменчивости входных данных и неоднородности информационных потоков. Серьезный недостаток существующих методов – отсутствие гарантированной способности обеспечить требуемую устойчивость и надежность при обработке данных в реальном времени, тогда как работа в реальном времени – ключевое условие функционирования для многих вариантов применения таких программных систем. В частности, гидроакустическое обследование подводной среды относится к классу задач, чувствительных к качеству работы программного обеспечения в реальном времени.

Таким образом, актуальность рассматриваемой проблемы обусловлена потребностью в разработке методов, которые способны, с одной стороны, обеспечивать эффективное обучение модели в условиях высокой степени изменчивости входных наборов данных, а с другой – выполнять задачи такого обучения за счет оптимального потребления ресурсов и в приемлемое время. Достижение высоких результатов в анализе неоднородных данных обеспечивается применением мягких вычислений и нечетких технологий, которые учитывают степень неопределенности и наличие вариаций в исходных данных для обучения. Адаптивная скорость обучения обусловлена использованием оптимизационных алгоритмов, таких как *AdaGrad, RMSprop* и *Adam*. Эти алгоритмы предполагают динамическую корректировку скорости обучения и, следовательно, более гибкую и точную настройку нейронной сети. Однако, как показывают последние исследования, даже они могут провоцировать проблемы переобучения и недостаточной обобщающей способности, в особенности при работе с многомерными сигналами, подверженными искажениям (например, реверберации) [6-9].

Другой важный аспект, обращающий на себя внимание исследователей – мониторинг метрик

производительности и использование контрольных сценариев. Эффективное отслеживание ключевых метрик (точности, полноты, времени отклика) существенно повышает качество результатов работы нейросетевых алгоритмов. Для систем, работающих с неоднородными исходными данными, обработка и консолидация статистики мониторинга критически важна в контексте обеспечения высокой степени надежности и стабильности качества выходного результата.

Исследование, описанное в данной статье, имеет целью применение методов и подходов, способных преодолеть обозначенные выше проблемы, а также получение практического опыта их внедрения. В основе рассматриваемых методов лежат и адаптивные алгоритмы, позволяющие улучшить качество и скорость обучения, и мониторинги производительности, обеспечивающие более высокую устойчивость систем к изменяющимся условиям функционирования и высокой степени вариативности входных данных.

Классически управлять обучением можно за счет динамического изменения параметров модели и настроек обучения в ответ на изменяющиеся условия, которые отслеживаются в процессе градиентного спуска. Основные подходы включают:

1. Применение адаптивной скорости обучения: при помощи алгоритмов *AdaGrad, RMSprop* и *Adam* можно динамически менять скорость машинного обучения $\eta$, что позволяет эффективно искать минимум функции потерь $L(\theta)$:

$$\theta_{t+1} = \theta_t - \eta_t \nabla_\theta L(\theta_t),$$

где $\theta_t$ – параметры сети на итерации $t$, а $\nabla_\theta L(\theta_t)$ – градиент функции потерь [10].

2. Использование регуляризации и раннего завершения, например, алгоритмы *L1* и *L2*, наряду с техникой раннего завершения, позволяют не допускать переобучения, создавая штрафы внутри модели за растущую сложность и снижающуюся производительность модели на заданном контрольном наборе данных [11].

3. Внедрение обучения с подкреплением на основе сценариев в виде заранее определенных действий или условий обеспечивает направленное обучение модели. В качестве подвида данного метода можно рассматривать интеллектуальных агентов, управляемых нейронной сетью через обучение с подкреплением.

Говоря об адаптивности процесса машинного обучения, нельзя исключать процесс синхронного мониторинга метрик и характеристик модели. Целью такого мониторинга является своевременное обнаружение отклонений от среднестатистических данных [12]. Основные элементы мониторинга включают:

1. Отслеживание метрик производительности, таких как точность модели, функция потерь, *F*-мера и другие, которые отражают эффективность модели в каждый момент времени обучения.

2. Анализ активационных функций и градиентов фиксирует случаи резкого изменения значений градиентов, что особенно важно для сетей с большим количеством слоев.

3. Включение в эксперименты контрольных сценариев, которые проверяют поведение модели в заранее определенных ситуациях, что помогает выявить проблемы. Также может быть задана оптимизационная функция в виде полиномиальной оценки важности различных параметров процесса имитационного моделирования.

**Методология.** Для решения конкретной задачи адаптации процесса машинного обучения в рамках имитации гидроакустического сигнала с последующей кластеризацией входных параметров модели были выбраны комбинации из трех алгоритмов по динамическому изменению скорости обучения нейронной сети и трех случаев контрольных сценариев в зависимости от уровня реверберации гидроакустического сигнала. Рассмотрим подробнее первые три алгоритма, которые анализируют градиентный спуск:

1. *AdaGrad* (от *Adaptive Gradient*, англ.) способствует поиску редких признаков за счет хранения суммы квадратов для каждого параметра сети. Это позволяет уменьшить скорость обучения для часто встречающихся параметров и оставаться на высокой скорости для редко встречающихся параметров. Значение данного преимущества значительно возрастает в случае многомерных сигналов в качестве результата предсказания и кластеризации большого количества параметров модели. Формула обновления рассчитывается как:

$$G_t = G_t + g_t^2,$$

$$\theta_{t+1} = \theta_t - \frac{\eta}{\sqrt{G_t + \epsilon}},$$

где $G_t$ – сумма квадратов обновлений, а $\epsilon$ – сглаживающий параметр, необходим для избежания деления на 0.

2. *RMSprop* (от *Root Mean Square propagation*, англ.) является модификацией метода *AdaGrad* и устраняет проблему затухания скорости обучения за счет экспоненциального скользящего среднего в знаменателе путем введения экспоненциального среднего градиента. Это делает данный алгоритм целесообразным для решения задач с сильно изменяющимися значениями параметров во время обучения [13]. Скользящее среднее и формула обновления для *RMSprop*:

$$E[g^2]_t = \gamma E[g^2]_{t-1} + (1-\gamma) g_t^2$$

$$\theta_{t+1} = \theta_t - \frac{\eta}{\sqrt{E[g^2]_t + \epsilon}} g_t,$$

где $E[g^2]_t$ – бегущее среднее в момент $t$, а $\gamma$ – коэффициент сохранения, $0 < \gamma < 1$.

3. *Adam* (от *Adaptive moment estimation*, англ.) соединил в себе идею накопления движения и идею не изменять значительно веса в случае типичных

признаков [14]. Тем самым данный алгоритм обеспечивает адаптацию изменения скорости обучения за счет того, что учитывает одновременно и среднее, и квадратичное среднее отклонение от градиента. Рассмотрим вычисление правила обновления с использованием комбинированного подхода:

$$m_t = \beta_1 m_{t-1} + (1-\beta_1) g_t,$$
$$\widehat{m_t} = \frac{m_t}{1-\beta_1^t},$$
$$\widehat{v_t} = \frac{v_t}{1-\beta_2^t},$$
$$\theta_{t+1} = \theta_t - \frac{\eta}{\sqrt{\widehat{v_t}+\epsilon}} \widehat{m_t},$$

где $\beta_1^t$ и $\beta_2^t$ – окна накопления в диапазоне [0;1), а $v_t$ по своей сути является $E[g^2]_t$ от *RMSprop*.

Существующее разнообразие алгоритмов оптимизации для вычисления градиентного спуска может быть разделено на три группы: на основе оценки градиента (*AdaGrad, AdaDelta*); на основе оценки момента градиента (*RMSprop, Nesterov Accelerated Gradient, SGD Momentum*); на основе адаптивной оценки момента (*Adam, Nadam, AMSGrad, Adamax*). Различия алгоритмов внутри каждой группы, такие как учёт предыдущего вектора значений или способы сглаживания, в настоящем исследовании несущественны, так как на текущем этапе работы важна разница в методе. Таким образом, для исследования были выбраны наиболее характерные представители каждого семейства алгоритмов: *AdaGrad, RMSprop, Adam*. В рамках данного исследования алгоритмы выбираются исходя из свойств пригодности для различных наборов входных данных. Так, например, оценка момента градиента подходит для нестационарных данных, а оценка самого градиента лучше показывает себя на разреженных данных [15-17], в то время как адаптивная оценка момента пытается оценить и то, и другое.

В рамках использования вышеприведенных методов необходимо анализировать и отслеживать метрики производительности, связанные с качеством обучения нейронной сети. К таким метрикам относят:

– Точность (*Precision*) как доля правильно классифицированных данных. Вычисляется как отношение количества верно классифицированных объектов к общему количеству объектов.

– Полнота (*Recall*) как отношение верно предсказанных положительных объектов к общему количеству положительных объектов.

– *F*-мера является параметром, характеризующим одновременно и точность, и полноту, лежащим в пределах от 0 до 1. *F*-мера вычисляется следующим образом:

$$F = 2 \times \frac{\text{Precision} \times \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}}.$$

– Скорость сходимости определяет, насколько быстро убывает функция ошибки. Она же говорит о том, насколько правильная архитектура выбрана и насколько адекватна динамическая скорость обучения. Это выражается в количестве итераций до достижения определенного порогового значения или дельты для функции потерь. Например, если функция потерь $L(\theta)$ уменьшается до определенного значения , скорость сходимости может быть выражена как минимальное $k$ такое, что $L(\theta_k) - L(\theta^*) < \epsilon$, где $L(\theta^*)$ – минимальное значение функции потерь.

Для анализа различных методик была выбрана генерация реверберационного гидроакустического сигнала с последующей кластеризацией входных параметров модели. Реверберация является важным параметром, который может существенно повлиять на качество обработки гидроакустических сигналов [18]. В эксперименте создается несколько имитационных сценариев с различными уровнями реверберации и оценивается, как они влияют на способность нейросети обеспечивать устойчивость работы по проведению имитационного моделирования. В процессе эксперимента рассматривались три основных сценария, отличающиеся сложностью генерируемого сигнала: с низкой реверберацией (10% от максимального значения, что соответствует минимальному порогу отражения акустических волн), со средней реверберацией (50% от максимального значения, стандартный случай умеренно сложных условий, в которых присутствует значительное количество отраженных сигналов) и с высокой реверберацией (90% от максимального значения, что характеризует сложные условия многократного отражения акустических волн).

Контроль алгоритмов адаптивной скорости обучения, осуществляемый посредством мониторинга производительности, учитывал в экспериментах следующие параметры:

1. Время отклика – среднее время, требуемое для обработки моделью одного набора сигналов (в миллисекундах). Это основная метрика для оценки способности системы работать в реальном времени.

2. Пропускная способность – количество данных, обработанных моделью за единицу времени (в Мбайт/с).

3. Загрузка процессора – процент использования процессорных мощностей (в процентах). Эта метрика отражает эффективность использования аппаратных ресурсов.

4. Задержка – время между поступлением сигнала и выдачей результата работы регрессионной нейросети (в миллисекундах).

В качестве метода внедрения контроля применялось раннее завершение в случае превышения порогов производительности оборудования. Рассмотрим обобщенный алгоритм работы и контроля при выполнении моделирования и обучения:

1. Начало;

2. Пока не пройден набор сценариев с векторами параметров $S$ и значениями целевой функции $F(S)$:

2.1. Выполнить инициализацию параметров из сценария $i$;

2.1. Пока не выполнено схождение оптимизационной целевой функции:

2.1.1 Выполнить замер времени, текущей производительности;

2.1.2. Если время выполнения выходит за рамки реального времени или ресурсы не позволяют продолжить выполнение, выйти из цикла;

2.1.3 Выполнить моделирование на текущем наборе параметров *S(i)*;

2.1.4 Используя оптимизированный градиентный спуск, вычислить следующие изменения *D(i, j)* такие, что *S(i) + D(i, j) ≈ F (i)*, исключить новый набор из исходного сценария;

2.1.5 Конец цикла;

2.2. Конец цикла;

3. Выполнить кластеризацию полученных наборов параметров;

4. Конец.

На рисунке 1 представлена структурная схема системы с подписанными операциями или характером передаваемых передаваемыми данными между её компонентами.




*Рисунок 1 – Структурная схема гибридной системы моделирования с последующей кластеризацией параметров*

**Результаты.** В рамках эксперимента было проведено обучение с различными оптимизаторами регрессионной нейросети с последующей кластеризацией результатов. В качестве математической модели использовался алгоритм имитации реверберационного сигнала на основе элементарных отражателей, что подробно описано авторами в работе [19].

Входными данными (набором сценариев) послужили векторы параметров гидроакустической обстановки:

1. Угол обзора (от 5° до 360°, шаг 1°);
2. Глубина (от 1 до 2001 метров, шаг 10 метров);
3. Скорость движения (от 0 до 35 км/ч, шаг 1 км/ч);
4. Количество замеров в секунду (от 0,1 до 1, шаг 0,1);
5. Частота излучателя (от 1 кГц до 50 кГц, шаг 1 кГц);
6. Скорость звука в воде (от 1400 до 1500 м/с, шаг 10 м/с);
7. Дисперсия при отражении, коэффициент (от 0 до 1, шаг 0,1);
8. Частота дискретизации: от (100 кГц до 200 кГц, шаг 10 кГц).

При рассмотрении сценариев с низкой, средней и высокой реверберацией фиксировалось значение дисперсии при отражении значениями 0.1, 0.5 и 0.9 соответственно.

Таким образом, для одного сценария исходное количество моделируемых комбинаций было .

Большинство из них (99,93%) отпало сразу же как неперспективные с точки зрения оптимизационной функции, которая также заключалась в сохранении режима реального времени и выражалась как минимальный период времени ответа испытываемого устройства. Для конкретного эксперимента было зафиксировано значение 100 миллисекунд.

В рамках данной статьи непосредственный интерес представляло влияние адаптированного процесса обучения на общий процесс имитации. Прежде всего, ключевым фактором являлось количество итераций, так как каждая итерация предполагала вычисление нового опорного значения математической модели, что занимало время, которое являлось критическим в данном эксперименте. В таблице 1 представлено количество комбинаций входных данных, для которых была проведена имитация в зависимости от использования рассматриваемых методов.

По результатам эксперимента для решения конкретной задачи наиболее эффективным является алгоритм *Adam*, поскольку его функция потерь

наиболее быстро стремится к нулю. Стоит также отметить, что на первых итерациях *Adam* показывает худшие результаты, но после 20 итераций является более перспективным оптимизационным алгоритмом. Таким образом, в случае долгого обучения (более 100 итераций) следует придерживаться этого подхода.

Результирующий график функции потерь в зависимости от оптимизатора представлен на рисунке 2.

В качестве второго эксперимента было проведено исследование влияния различной гидроакустической обстановки на процесс обучения нейросети.

Ключевые параметры результирующей производительности представлены в таблице 2.

*Таблица 1 – Количество имитаций в зависимости от комбинации методов*

| | Без мониторинга производительности | С мониторингом производительности |
|---|---|---|
| Классический градиентный спуск | $8{,}7 \cdot 10^{9}$ | $9{,}1 \cdot 10^{7}$ |
| AdaGrad | $6{,}6 \cdot 10^{8}$ | $6{,}9 \cdot 10^{6}$ |
| RMSprop | $6{,}1 \cdot 10^{7}$ | $6{,}3 \cdot 10^{5}$ |
| Adam | $5{,}7 \cdot 10^{7}$ | $6{,}0 \cdot 10^{5}$ |

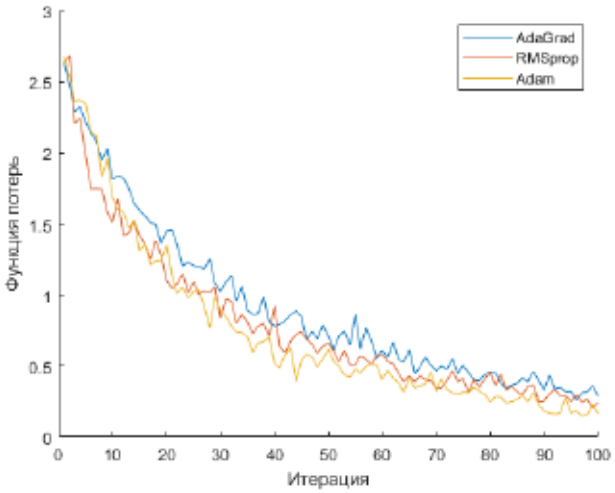



*Рисунок 2 – График сравнения функций потерь для оптимизаторов Adam, RMSprop, AdaGrad*

*Таблица 2 – Результаты производительности системы в имитационных сценариях*

| | Реверберационная обстановка | | |
|---|---|---|---|
| | Низкая (10%) | Средняя (50%) | Высокая (90%) |
| Время отклика, мс | 52 | 73 | 124 |
| Пропускная способность, Мб/с | 19,8 | 14,7 | 9,5 |
| Загрузка процессора, % | 45% | 77% | 89% |
| Задержка, мс | 12 | 27 | 53 |

Замеры производились при помощи *National Instruments PXI* (*PCI eXtensions for Instrumentation*) – модульной платформы для автоматического тестирования и измерений, широко применяемой в различных отраслях, включая гидроакустику. Интеграция различных измерительных модулей на платформе *PXI* обеспечивает высокую точность и надежность результатов [20]. Платформа позволяет гибко настраивать конфигурацию оборудования в зависимости от специфических требований тестирования, что позволяет запустить на ней регрессионное машинное обучение.

Использование этих особенностей позволяет выполнить моделирование заявленных в исследовании ключевых факторов: вариативность входных данных для обучения и работы системы, высокую степень неоднородности этих данных, имитацию статистических отклонений и помех, а также сформировать полноценные модели многомерных сигналов, что приближает условия полунатурных испытаний к натурным.

**Обсуждение.** Наиболее критичными показателями производительности, выявленными в процессе исследования, являются загрузка процессора, равная 89% при обработке в режиме реального времени, и пропускная способность канала. Полученные результаты означают, что техническое оборудование работает практически на пределе своей мощности и аддитивное добавление других сигналов (шумов, помех) в цифровую гидроакустическую обстановку

может создавать существенные проблемы для поддержания режима реального времени.

Совместное применение мониторинга производительности как раннего завершения обучения и оптимизационного алгоритма *Adam* позволило многократно сократить количество неперспективных имитаций, что позволяет быстрее приступать к кластеризации и вычищает из рассматриваемой выборки все, что не удовлетворяет условиям реального времени.

Исходя из полученных результатов для адаптации процесса машинного обучения в рамках регрессионного подбора параметров имитационной модели многомерного гидроакустического сигнала с последующей кластеризацией были выбраны сценарий средней реверберации и оптимизационный алгоритм *Adam*.

В таблице 3 представлены наилучшие и наихудшие показатели машинного обучения, полученные в результате экспериментов.

*Таблица 3 – Показатели качества процесса машинного обучения*

| | Низкая реверберация, Adam | Высокая реверберация, AdaGrad |
|---|---|---|
| Точность | 0,9327 | 0,8794 |
| Полнота | 0,9471 | 0,8619 |
| F-мера | 0,9398 | 0,8706 |
| Скорость сходимости (итерации) | 119 | 135 |

**Выводы.** Гибридные системы искусственного интеллекта в сочетании с адаптивными методами обучения модели показали свою эффективность для имитационного моделирования с использованием регрессионной нейросети и последующей кластеризации многомерных гидроакустических данных.

Наилучшие результаты для длительных сеансов обучения показал оптимизационный алгоритм Adam, обеспечивший более быстрое и стабильное снижение функции потерь. Его потенциал наиболее перспективен для применения в задачах, требующих долгосрочной адаптации и устойчивости модели, выраженной в сохранении режима реального времени для моделирования.

Тем не менее, высокие показатели загрузки процессора и ограниченная пропускная способность каналов связи указывают на необходимость дальнейшей оптимизации утилизации аппаратных ресурсов с целью поддержания режима работы в реальном времени.

Перспективы дальнейших исследований заключаются в разработке алгоритмов обучения и конфигураций нейросетей, способных снизить требования к аппаратным ресурсам, а также в изучении влияния различных типов гидроакустических помех на качество результата работы алгоритма. Кроме того, следует рассмотреть возможность внедрения дополнительных методов мониторинга и адаптации для улучшения работы системы в условиях высокой степени изменчивости входных данных.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Харченко А.С., Новоженов М.Ю., Ткаченко В.В. Методы борьбы с переобучением в нейронных сетях//Цифровизация экономики: направления, методы, инструменты. – 2023. – С. 319-322.
2. Мальцев В.А. Оптимизаторы нейронных сетей // Научный форум: Инновационная наука: сб. ст. по материалам XXII междунар. науч.-практ. конф. – 2019. – С. 61.
3. Бождай А.С., Евсеева Ю.И., Артамонов Д.В. Использование машинного обучения с подкреплением в создании самоадаптивного программного обеспечения// Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки, 2019, N 3 (51). – С. 58-68.
4. Wilson A.C., Roelofs R., Stern M., Srebro N., Recht B. The marginal value of adaptive gradient methods in machine learning// Advances in neural information processing systems, 2017. – Т. 30.
5. Cherkassky V., Gehring D., Mulier F. Comparison of adaptive methods for function estimation from samples//IEEE Transactions on Neural Networks, 1996, Т. 7, N 4. – С. 969-984.
6. Gheibi O., Weyns D., Quin F. Applying Machine Learning in Self-adaptive Systems: A Systematic Literature Review//ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems, 2020, Vol. 15, Applying Machine Learning in Self-adaptive Systems, No. 3, P. 1-37.
7. Połap D., Wawrzyniak N., Włodarczyk-Sielicka M. Side-scan sonar analysis using ROI analysis and deep neural networks//IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, Т. 60, С. 1-8.
8. Mustika I.W., Adi H.N., Najib F. Comparison of keras optimizers for earthquake signal classification based on deep neural networks//2021 4th International Conference on Information and Communications Technology (ICOIACT). – IEEE, 2021. – С. 304-308.
9. Desai J., Markande S.D. A Comparative Study of Optimizers for Deep Learning Model used for Evaluating the Signal to Noise Ratio (SINR) of Large Intelligent Surfaces. – 2023.
10. Chakrabarti K., Chopra N. Generalized AdaGrad (G-AdaGrad) and Adam: A state-space perspective//2021 60th IEEE Conference on Decision and Control (CDC). – IEEE, 2021. – Generalized AdaGrad (G-AdaGrad) and Adam. – С. 1496-1501.
11. Лозко Д.В., Королев О.Л. Методы регуляризации l1 и l2 в решении задач DATA SCIENCE//Актуальные проблемы и перспективы развития экономики. – 2020. – С. 184-184.
12. Боженко В.В., Клюканов В.К. Применение алгоритмов машинного обучения в задачах классификации и кластеризации//Обработка, передача и защита информации в компьютерных системах'22. – 2022. – С. 28-33.
13. Xu D., Zhang S., Zhang H., Mandic D.P. Convergence of the RMSProp deep learning method with penalty for nonconvex optimization//Neural Networks, 2021, Т. 139, С. 17-23.
14. Методы оптимизации в машинном и глубоком обучении. От простого к сложному. - URL: https://habr.com/ru/articles/813221/ (дата обращения: 10.11.2024).
15. Ruder S. An overview of gradient descent optimization algorithms/arXiv:1609.04747. - arXiv, 2017.
16. 10 famous Machine Learning Optimizers. – URL: https://dev.to/amananandrai/10-famous-machine-learning-optimizers-1e22 (дата обращения: 10.11.2024).
17. Методы оптимизации нейронных сетей. – URL: https://habr.com/ru/articles/318970/ (дата обращения: 10.11.2024).
18. Крутяков М.А., Розанов И.А., Сотников А.А. Имитационное моделирование гидроакустического реверберационного сигнала средствами FPGA//Технологии инженерных и информационных систем, 2019, N 1, С. 45-56.
19. Крутяков М.А., Розанов И.А., Сотников А.А. Имитационное моделирование сигнала гидроакустической граничной реверберации в базисе Хартли//Современная Наука: Актуальные Проблемы Теории И Практики. Серия: Естественные И Технические Науки, 2019, N 1.
20. Rogovaia M.A., Kostyuchenko D.S., Kalashnikov O.A., Mashkova A.Y. An Automated System for Quick Checking of NI PXI Equipment Performance with a Large Number of Signal Lines//2021 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – IEEE, 2021. – С. 1-5.

*Статья поступила в редакцию 04.11.2024*
*Статья принята к публикации 13.12.2024*

***Статья выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-11-00049 от 12.05.2022).***

УДК 004.855.5.
EDN: VILAEV

# АНАЛИЗ И ВЫБОР МЕТОДА ИМПУТАЦИИ ПРОПУЩЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ДЛЯ НЕБОЛЬШОГО НАБОРА МЕДИЦИНСКИХ ДАННЫХ

© Автор 2024
SPIN: 2321-3879
ORCID: 0009-0006-3530-5703
**ПОПОВА Ольга Александровна,** преподаватель кафедры
«Медицинской информатики и биологической физики»
*Тюменский государственный медицинский университет*
*(625013, Россия, Тюмень, улица Одесская, 54, e-mail: PopovaOA@tyumsmu.ru)*

**Аннотация.** Статья рассматривает популярные методы импутации пропущенных значений для небольшого набора комплексных клинических медицинских данных с высокой долей пропусков в условии ограниченных вычислительных ресурсов. Для обработки медицинских данных проблема импутации пропущенных значений стоит очень актуальна, так как от точности и правильности сбора анамнеза зависит дальнейшая тактика лечения пациента. В работе были изучены и проанализированы методы: *MICE*, *Miceforest, KNN*, глубокие нейронные сети, а также разработаны с целью сравнения и дальнейшей реализации гибридные методы (*KNN-KNN, KNN-MICE, KNN-MF, KNN-Datawig*). При сравнении методов импутации данных был выбран метод *KNN-MF*, так как данный метод показал высокие показатели качества и точности модели. В исследовании подведен итог и даны рекомендации по использованию метода *KNN-MF,* в частности, для предобработки данных (восстановлении пропущенных значений) при разработке модуля рекомендательной системы диагностики заболеваний печени. Для улучшения метода предлагается подбор оптимальных гиперпараметров, трансформация данных, использование итеративного подхода и ансамблевых методов импутации данных, а также включение дополнительных признаков.

**Ключевые слова:** импутация пропущенных значений, оценка качества модели регрессии, *MICE*, *Miceforest, KNN*, *KNN-MF*, *KNN-MICE, KNN-KNN, KNN-Datawig,* глубокие нейронные сети, *RMSE*, *MAE*, *MAPE, R2, D2.*

# ANALYZE AND SELECT A METHOD FOR MISSING VALUE IMPUTATION FOR A SMALL MEDICAL DATASET

© The Author 2024
**POPOVA Olga Aleksandrovna,** teacher of the Department of Medical Informatics and Biological Physics
*Tyumen State Medical University*
*(625013, Russia, Tyumen, Odesskaya street, 54, e-mail: PopovaOA@tyumsmu.ru)*

**Abstract.** The article examines popular methods of missing value imputation for a small set of complex clinical medical data with a high proportion of missing values in the context of limited computing resources. For the processing of medical data, the problem of imputation of missing values is very relevant, since for newly admitted patients it is necessary to quickly process a large amount of scattered and often incomplete information, where the further tactics of treating the patient depend on the accuracy of the history collection. The following methods were studied and analyzed: *MICE*, *Miceforest*, *KNN*, deep neural networks, and hybrid methods *(KNN-KNN, KNN-MICE, KNN-MF, KNN-Datawig)* were developed for comparison and further implementation. When comparing data imputation methods, the *KNN-MF* method was chosen, since this method showed high quality and accuracy of the model. The study summarizes and gives recommendations on the use of the *KNN-MF* method, in particular, for data preprocessing (recovery of missing values) when developing a module for a recommendation system for diagnosing liver diseases. To improve the method, it is proposed to select optimal hyperparameters, transform data, use an iterative approach and ensemble methods of data imputation, as well as include additional features.

**Keywords**: missing value imputation, regression model quality evaluation, *MICE, Miceforest, KNN, KNN-MF, KNN-MICE, KNN-KNN, KNN-Datawig,* deep neural networks, *RMSE, MAE, MAPE, R2, D2.*

***Для цитирования:*** *Попова О.А. Анализ и выбор метода импутации пропущенных значений для небольшого набора медицинских данных / О.А. Попова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 4(68). – С. 76-89. – EDN: VILAEV.*

**Введение.** С учетом широкого применения искусственного интеллекта во многих областях науки и производства, важно отметить его положительный опыт использования и колоссальные возможности при обработки большого объема данных. Особенно полезно и необходимо применение цифровых возможностей в сфере здравоохранения, где накоплена огромная база результатов по различным методам исследования. Согласно указу президента Российской Федерации от 10.10.2019 г. №490 «О развитии искусственного интеллекта в РФ». Утверждена «Национальная стратегия развития искусственного интеллекта на период до 2030 г.»: 22.а). Повышение качества услуг в сфере здра-

воохранении (включая профилактические обследования, диагностику, основанную на анализе изображений, прогнозирование возникновения и развития заболеваний, подбор оптимальных дозировок лекарственных препаратов, сокращение угроз пандемий, автоматизацию и точность хирургических вмешательств) [1]. Таким образом проблема исследования, развития и внедрения систем прогнозирования и поддержки принятия решений в сферу здравоохранения стоит очень актуально [2,3]. Первым и основным этапом работы для построения систем поддержки принятия решений (СППР) является предобработка и анализ состава входных данных. Существует достаточное количество методов предобработки, анализа и оценки пространства наблюдаемых признаков, целью которых является определение взаимосвязи между признаками, классификация и уменьшение числа признаков. Однако следует учесть, что медицинские данные весьма разнотипны и обширны (физиологические, анатомические и биохимические показатели, инструментальные методы исследования), а анализ каждого клинического случая требует сбор именно комплексного анамнеза по каждому пациенту. Стоит отметить, что подобный обширный перечень данных у врача медицинского учреждения может быть неполным, так как пациент мог не прийти на диагностические исследования, результаты исследований могли быть некорректно внесены в информационную систему, либо отсутствовать по некоторым параметрам. Это приводит к потере общей картины клинического случая, так как каждый признак, а также динамика его параметров, могут находится в явных и неявных корреляционных связях с другими признаками. Поэтому до начала использования факторного анализа при предобработке большого числа разнородных медицинских данных нужно особое внимание уделить анализу и выбору метода восстановления данных, чтобы не потерять ценные признаки, находящиеся в условиях неполноты информации, и не искажать результаты в сторону неточного состояния.

Существует достаточно большое количество работ посвященных разработке методов по восстановлению пропущенных значений. Так, в работе [4] авторы за основу своего алгоритма использовали оптимальное решение наименьших квадратов, которое минимизирует ожидаемую среднеквадратическую ошибку с учетом ожидаемой частоты пропущенных значений. На основе этого они предложили рекурсивный алгоритм для создания и обновления линейной регрессии в режиме онлайн без доступа к историческим данным. В работе [5] авторы предложили восстановление отсутствующих значений, основанное на использовании принципа *k* ближайших соседей и меры *DTW*. Алгоритм используется для восстановления отсутствующих значений во временном ряде, который представляет собой значения уровня экспрессии генов, полученные с помощью ДНК-микрочипов в серии экспериментов. В исследовании [6] авторы предложили метод восстановления значений временного ряда *kNNI* (*k-Nearest Neighbor Imputation*) на основе ближайших соседей. Метод предписывает сначала найти *k* «соседей» – объектов, имеющих схожие значения в столбцах (атрибутах объекта), отличных от выбранного (без конкретизации меры схожести). Затем отсутствующее значение синтезируется на основе значений в выбранном атрибуте у соседей. В работе [7] Троянской (Troyanskaya) рассматривалась возможность использования метода взвешенных ближайших соседей, когда вес соседа пропорционален схожести с образцом поиска (по евклидовой метрике). Также некоторые авторы [8] предложили использовать нейронные сети для восстановления пропущенных значений при условии фиксации временных данных и суммирования контекста наблюдения с помощью итеративной сети вменения, в системах интернета вещей (*Lot*). В работе [9] была описана двунаправленная рекуррентная нейронная сеть *BRITS* (*Bidirectional Recurrent Imputation for TimeSeries*) для восстановления многомерных временных рядов. Первый слой обрабатывает входную подпоследовательность, а второй слой – ее реверс-копию (где точки взяты в обратном порядке). Каждое восстановленное значение формируется как среднее от прогнозов обоих слоев, которое далее предается на вход следующего нейрона.

В работе [10] описано восстановление многомерных временных рядов с помощью нейросетевой модели *NAOMI* (*Non-AutOregressive Multiresolution Imputation*), которая имеет архитектуру Автоэнкодер (*Autoencoder*). Архитектура данной модели реализуется с помощью двух сетей – Энкодер (*Encoder*) и Декодер (*Decoder*). Сначала Энкодер преобразует входные данные в скрытое состояние (*hidden state*), имеющее малую размерность. Затем скрытое состояние подается на вход Декодеру, который формирует итоговый ответ. В *NAOMI* каждая из указанных сетей представляет собой два слоя рекуррентных нейронов, направленных друг к другу. Связка Энкодера и Декодера рекурсивно обрабатывает части входной подпоследовательности, находящиеся слева и справа от ее серединной точки.

В различных системах электронных медицинские записей пациентов могут встречаться пропущенные значения различной природы пропусков: случайные (*Missing Completely at Random* (*MCAR*)), имеющие латентные зависимости от других переменных (*Missing at Random* (*MAR*)) и имеющие явные зависимости от целевой переменной (*Missing Not at Random* (*MNAR*)). В частности, при исследовании (комплексных клинических медицинских данных, ККМД) большой интерес представляет восстановление пропущенных значений, обусловленных латентными зависимостями, так как медицинские данные,

обусловленные высокой корреляцией и размерностью. Так в работе Мантровой особое внимание уделяется взаимосвязи пропусков (55%) и значимого признака, где: «В реальности эти два фактора чаще всего действуют совместно, а итоговые изменения представляют собой сумму их влияний» [11]. В работах, посвященных исследованиям в области клинической гинекологии, были проанализированы дневники наблюдений пациенток, страдающих эндометриозом. В данных исследованиях часть данных отсутствовала по причине цензурирования [12, 13], а это почти 50% пропусков, при среднем течении эндометриоза.

Несмотря на активные исследования в области улучшения качества обработки данных для восстановления (импутации) пропущенных значений, мы не нашли работ, описывающих точные и быстрые методы для обработки ККМД небольшого объема с высокой долей пропусков, не менее 50 процентов, в условиях ограниченных вычислительных ресурсов. А использование имеющихся методик импутации данных, для больших объемов медицинских данных, а также требующих высоких вычислительных ресурсов или разработанных под другие сферы деятельности еще нуждается в апробировании, анализе и адаптации.

Мы также не нашли исследований, посвященных разработке гибридных методов и их сравнению. Мы считаем, что выбор метода импутации для небольшого объема ККМД с высокой долей пропущенных значений (не менее 50%) может стать важным этапом при разработке модуля в системе поддержки принятия врачебных решений. Это может значительно повысить точность диагностики и прогнозирования заболеваний, что положительно скажется на качестве медицинских услуг.

Сложность ККМД и необходимость точного восстановления пропущенных значений обуславливают важность и актуальность проблемы выбора эффективного метода восстановления данных.

Целью работы является выбор метода восстановления пропущенных значений, который будет эффективен для комплексных клинических медицинских данных небольшого объема с высокой долей пропусков, в условиях ограниченных вычислительных ресурсов.

Задача работы на первом этапе заключается в изучении, анализе, тестировании существующих методов импутации пропущенных значений. На втором этапе исследования стоит задача разработки и апробировании гибридных методов импутации данных, сравнение результатов их работы и выбор метода под имеющийся качественный состав набора ККМД.

**Методология.** Этапы методологии исследования:

1. Описание и анализ входных данных
2. Подготовка входных данных для дальнейшей их обработки алгоритмами машинного обучения импутации данных.
3. Изучение и анализ существующих методов восстановления данных
4. Описание этапов апробации методов на исследуемом наборе данных

Массив входных данных представлен реальным реестром медицинских данных 104 пациентов по анатомическим, физиологическим параметрам, биохимическим и аппаратным методам исследования. Данные пациенты прошли диагностику печени и имеют подтверждённый диагноз НАЖБП (неалкогольная жировая болезнь печени) в определённой стадии заболевания. Реестр медицинских данных представляет собой *EXEL* файл с расширением *.xlsx*, названия полей массива включает в себя 21 параметр: «*Sex*», «*Age*», «*Diagnosis*», «*F*», «*S*», «*Height*», «*Weight*», «*BMI*», «*Waist circumference*», «*Gamma glutamyl transferase (GGT)*», «*Triglycerides*», «*High density lipoprotein cholesterol*», «*Low-density lipoprotein cholesterol*», «*Alanine aminotransferase (ALT)*», «*Alkaline phosphatase*», «*Total protein*», «*Total cholestero*», «*Aspartate aminotransferase (AST)*», «*Albumen*», «*Total bilirubin*», «*Glucose*». Параметры: «*Sex*», «*Age*», «*Diagnosis*» представлены категориальными значениями, остальные параметры датасета имеют числовой формат. Доля пропущенных значений в сете данных составляет не менее 50 процентов (в сумме от всех столбцов сета данных и не менее 50 процентов в одном столбце).

В задачах машинного обучения для получения наиболее точного и высокого результата необходимо тщательно подготовить входные данные. Так как модели машинного обучения легче и точнее работают с «чистыми» данными: нормализованными, корректными числовыми значениями, очищенными от шума, полными (без пропусков значений) и небольшой размерности. Это нужно учитывать при работе с комплексными клиническими медицинскими данными, так как они имеют высокую размерность, разнотипность, наличие ошибок, обусловленных человеческим фактором. Таким образом на этапе подготовки ККМД с помощью программных средств анализируется размерность дата фрейма и тип данных, после чего категориальные переменные подвергаются преобразованию в числовой формат (перекодирование), устраняются аномальные значения и дубликаты. В результате обработки остаются строки с информативными параметрами значений в массиве данных.

Для работы с данными были использованы программные средства: *MS EXEL* и язык программирования *Python* в облачной среде *GoogleColab*.

С помощью встроенных инструментов программы *MS EXEL* из реестра ККМД были удалены дубликаты, малоинформативные данные, найдены и исправлены аномальные значения, с помощью встроенных фильтров был найден и дискретизирован широкий диапазон значений поля «*Age*» («Возраст»).

При формировании дата фрейма и анализа сос-

тава массива данных была использована *open-source* библиотека *Pandas*.

Для перевода категориальных данных в числовые (векторизация) [11] был использован метод *OrdinalEncoder* библиотеки *Scikit-learn* (библиотека машинного обучения). Метод *OrdinalEncoder* реализует порядковое кодирование категориальных переменных, в таком случае целочисленные значения имеют естественную упорядоченную связь между собой, и алгоритмы машинного обучения могут понять и использовать эту связь.

Так как атрибуты ККМД находятся в широких диапазонах значений, а для корректной работы алгоритмов машинного обучения необходимо привести различные масштабы признаков к единому виду, так для нормализации ККМД был использован метод *MinMaxScaler* библиотеки машинного обучения *Scikit-learn*, данный метод не уменьшает влияние выбросов, но линейно масштабирует их до фиксированного диапазона, например от 0 до 1, где наибольшая встречающаяся точка данных соответствует максимальному значению, а наименьшая соответствует минимальному значению, представлено формулой 1.

$$x' = 2\frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} - 1, \quad (1)$$

где $x$ – входное значение.

А так как в дальнейшем модель машинного обучения будет использоваться рекомендательной системе с целью прогноза значений, то для этой цели данные были приведены к нормальному распределению (стандартизированы) методом *StandartScaler* библиотеки машинного обучения *Scikit-learn*, данный метод применяет стандартизацию к входной переменной (функции), удалив среднее значение и масштабируя его до единичной дисперсии, представлено формулой 2.

$$z = (x - u)/s \quad (2)$$

где $u$ – среднее значение обучающих выборок или ноль при *with_mean=False*,

$s$ – стандартное отклонение обучающих выборок или единица, при *with_std=False*.

Центрирование и масштабирование происходят независимо для каждого признака путем вычисления соответствующей статистики по выборкам в обучающем наборе. Затем среднее значение и стандартное отклонение сохраняются для использования в последующих данных.

На следующем этапе подготовки данных для корректной работы алгоритмов машинного обучения в задачах прогнозирования необходимо выбрать подходящий метод восстановления (импутации) пропущенных значений [14, 15]. Согласно Методологическим положениям: «процесс импутации – это замещение ошибочных, противоречивых и отсутствующих ответов в процессе редактирования данных другими ответами – значениями показателей» [16]. Характерной особенностью исследуемых ККМД является их многообразие, специфичность, разнотипность и высокая важность каждого признака, что связано с наличием неявных корреляций между признаками. Таким образом выбор методов импутации данных накладывает ограничения из-за характера восстанавливаемых значений. Так как при восстановлении значений важно учитывать влияние сопутствующих признаков в условиях неявной природы пропусков при механизме пропусков *MAR* (*Missing At Random*), *MNAR* (*Missing Not At Random*) [17]. Данным требованиям удовлетворяют следующие методы вменения: *MICE, Miceforest, k-Nearest Neighbour*, глубокие нейронные сети, гибридные методы импутации пропущенных значений.

*Описание методов восстановления данных.* Одним из рекомендуемых подходов к вменению пропущенных значений по механизму пропусков *MAR* и *MNAR* является использование итеративной модели вменения, а именно множественное вменение.

*MICE* – это метод множественного вменения пропущенных значений при помощи цепных уравнений (*multivariate imputation by chained equations, MICE*) [18-20]. Механизм работы метода включает в себя несколько циклов, которые повторяются до тех пор, пока результаты обновленных вмененных значений не сойдутся. На первом этапе пропуски заполняются среднеарифметическим, на втором – методом линейной регрессии. Для количественных переменных используется сопоставления на основе предсказанного среднего (*predictive mean matching*), для качественных – логистическая регрессия (*logistic regression*), представлено формулами 3 и 4.

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i = \frac{1}{n}(x_i + \cdots + x_n), \quad (3)$$

где $x$ – множество чисел,

$n$ – количество чисел в множества

$$f(x, b) = b_1 x_1 + b_2 x_2 + \cdots + b_k x_k = \sum_{j=1}^{k} b_j x_j = x^T b, \quad (4)$$

где $x^T$–$(x_1, x_2, \ldots x_k)$ – вектор регрессоров,

$b = (b_1, b_2, \ldots, b_k)^T$ – вектор-столбец параметров (коэффициентов).

На третьем этапе отсутствующие значения заменяются прогнозами (вмененими) из регрессионной модели. Далее установленные вмененные значения используется как независимые переменные в регрессионных моделях для других переменных.

На четвертом этапе формируется критерий работы алгоритма – это разность между вмененными значениями предыдущих этапов. Этапы повторяются (каждый раз используя новые заполненные значения в качестве отправной точки) до тех пор, пока разница между двумя последними значениями не будет близка нулю (до сходимости). При последующих циклических итерациях, 1 этап (где брались средние значения для начала цикла) не используется, вместо него используются значения, полученные на предыдущих этапах вменения.

Теоретически метод множественного вменения – это метод Монте-Карло (в основе модель многократного обсчитывания результата большого числа

случайных чисел с последующим усреднением результата по ним) [21], в котором пропущенные значения заменяются смоделированными версиями $m$ >1, где $m$ (количество вменений) обычно невелико (например, 3-10).

Метод Монте-Карло представлен формулой 5:

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{b-a}{N}\sum_{i=1}^{N} f(u_i), \quad (5)$$

где $N$ – количество точек равномерно распределенных на $[a, b]$,

$\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} f(u_i)$ – выборочное среднее математического ожидания случайной величины.

Впервые в трудах Рубина был описан метод для вывода «повторного вменения», где каждый из смоделированных полных наборов данных анализировался стандартными методами, а результаты объединялись для получения оценок и доверительных интервалов. При множественном вменении, создаются несколько ($m$) наборов данных. В своей работе Рубин [22] показывает эффективность оценки, основанной на $m$ вменениях, представлено формулой 6:

$$(1+\frac{\gamma}{m})^{-1} \quad (6)$$

где $\gamma$ – доля недостающих значений для оцениваемой величины

$m$ – количество вменений.

В таблице 1 приведены достигнутые эффективности для различных значений $m$ и доли пропущенных значений из работы Рубина.

*Таблица 1 – Эффективность соотношения количества вменений от доли пропущенных значений*

| | $\gamma$ | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| $m$ | 0.1 | 0.3 | 0.5 | 0.7 | 0.9 |
| 3 | 97 | 91 | 86 | 81 | 77 |
| 5 | 98 | 94 | 91 | 88 | 85 |
| 10 | 99 | 97 | 95 | 93 | 92 |
| 20 | 100 | 99 | 98 | 97 | 96 |

Программная реализации алгоритма вменения пропущенных значений *MICE*, изначально представлена *R*-пакетом *MICE* (библиотека машинного обучения *scikit-learn*, где реализован класс *IterativeImputer*).

Класс *IterativeImputer* моделирует каждый признак с пропущенными значениями как функцию других признаков и использует эту оценку для вменения. Этот процесс проходит итеративно для каждого признака в повторяющемся цикле, а затем повторяется для раундов вменения *max_iter*: на каждом этапе столбец объекта обозначается как выходной $y$, а другие столбцы объектов обрабатываются как входные $X$. Модель регрессии обучается на известных данных ($X$, $y$), где $y$ является целевой переменной. Затем уже обученная модель используется для прогнозирования пропущенных значений $y$. После чего возвращаются результаты последнего раунда вменения. К тому же класс *IterativeImputer* очень гибкий, его можно использовать с различными средствами оценки для выполнения циклической регрессии [23, 24]. Реализация класса *IterativeImputer* в библиотеке машинного обучения *scikit-learn* использует решение *R*-пакета *MICE* (многомерное вменение с помощью цепочек уравнений). *Класс IterativeImputer* можно использовать для нескольких вменений, многократно применяя его к одному и тому же набору данных с разными случайными начальными числами, при установке гиперпараметра *sample_posterior=True*.

*Miceforest* – это метод множественного вменения пропущенных значений помощи цепных уравнений (*MICE*) и метода деревьев решений (в частности для решения задачи регрессии – метод случайного леса (*Random Forest, RF*)). *RF* – это непараметрический метод восстановления пропущенных значений, который может работать с разными типами переменных одновременно, путем усреднения по множеству необрезанных деревьев регрессии. При работе метода *RF* на первом этапе построения модели на тренировочном наборе данных учитывается ошибка неотобранных данных, затем для каждого объекта эта ошибка усредняется по всему случайному лесу. Для оценки важности полученного параметра после тренировки, значения полученного признака перемешиваются случайным образом, и ошибка вычисляется снова.

Важность параметра оценивается путём усреднения для каждого дерева в ансамбле, разности показателей ошибок неотобранных элементов до и после перемешивания значений. При этом значения таких ошибок нормализуются на стандартное отклонение [46], ошибка вменения представлена формулой 7.

$$mg(X,Y) = av_k I(h_k(X)=Y) - \max_{j\neq Y} av_k I(h_k(X)=j), \quad (7)$$

где $I()$ – это индикаторная функция (маржа), чем больше маржа тем больше доверия к классификации.

$$PE^* = P_{XY}(mg(X,Y)<0), \quad (8)$$

Где $PE^*$ – последовательность вероятностей индексов в пространстве $X$, $Y$.

$X$, $Y$ – это индексы указывающие вероятность нахождения в заданном пространстве $X$, $Y$,

$hk(X) = h(X, \Theta_k)$ – случайные леса,

$$P_{X,Y}(P_\Theta(h(X,\Theta)=Y) - \max_{j\neq Y} P_\Theta(h(X,\Theta)=j)<0), \quad (9)$$

где $hk(X) = h(X, \Theta k)$ – случайные леса,

После вменения пропущенных значений производительность оценивается с использованием нормализованной среднеквадратической ошибки (*NRMSE*).

Используя встроенные оценки ошибок слу-

чайного леса, можно оценить ошибку вменения без необходимости использования тестового набора данных. Представлена формулой сходимости 10 случайных лесов:

$$NRMSE = \sqrt{\frac{mean((X^{true} - X^{imp})^2)}{var(X^{true})}} \quad (10)$$

Где $X^{true}$ – полная матрица данных,

$X^{imp}$ – матрица вмененных данных.

В данной формуле используется среднее значение и переменная в качестве краткого обозначения эмпирического среднего значения и дисперсии, рассчитанных только по непрерывным пропущенным значениям. Для категориальных переменных используется доля ошибочно классифицированных записей (*PFC*) по отношению к категориальным пропущенным значениям, $\Delta F$. В обоих случаях хорошая производительность приводит к значению, близкому к 0, а плохая производительность – к 1 [24, 25].

Программная реализация метода представлена 4 классами библиотеки машинного обучения *scikit-learn*: класс *KernelDataSet* (модели работы алгоритма *MICE* сохраняются внутри экземпляра класса, который можно использовать для вменения новых данных), класс *MultipleImputedKernel* (имеет дополнительные методы для доступа и сравнения нескольких наборов данных), класс *ImputedDataSet* (сохраняет ампутированный набор данных, функция *impute_new_data*()), класс *MultipleImputedDataSet* (содержит коллекцию импортированных наборов данных, реализует дополнительные методы для сравнения вменений между наборами данных).

Метод *k-Nearest Neighbour* (*k* ближайших соседей, *KNN*) – это не параметрический алгоритм контролируемого машинного обучения, используемый для решения задач классификации и регрессии. В этом методе *k* ближайших соседей выбираются на основе некоторой меры расстояния между исследуемым объектом и его ближайшими соседями, таким образом среднее значение расстояния будет использоваться в качестве оценки вменения [26]. Метод предусматривает указание количество *k* ближайших соседей и метрики расстояния между ближайшими объектами исследования (метрики расстояния варьируется в зависимости от типа данных). Например, для количественных данных будут использоваться евклидовы, манхэттенские и косинусные метрики расстояния, а для категориальных типов данных – расстояние Хэмминга.

Функция Эвклидового расстояния [27], формула 11:

$$d(x_i, x_j) = \|x_i - x_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^{m} (x_{ik} - x_{jk})^2}, \quad (11)$$

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

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

Вычисление значения пропущенных атрибутов на основании дистанций от попавших в область объектов и соответствующих значений этого же атрибута у объектов, формула 12:

$$y_k = \frac{\sum_{i-1}^{n} k_i d(x, a_i)^2}{\sum_{i-2}^{n} d(x, a_i)^2}, \quad (12)$$

Где $a_i$ – это $i$ объект, попавший в область,

$k_i$ – значение атрибута $k$ у заданного объекта $a_i$,

$d$ – расстояние до соседнего объекта,

$x$ – новый объект, $x_k$ – атрибут нового объекта.

Программная реализация метода *k-Nearest Neighbour* на языке программирования *Python* представлена в библиотеке машинного обучения *Scikit-learn* в классе *KNNImputer* библиотеки машинного обучения. По умолчанию *nan_euclidean_distances* для поиска ближайших соседей используется евклидова метрика расстояния, поддерживающая пропущенные значения.

Для конкретного объекта отсутствующее значение вычисляется на основе значений его ближайших соседей (параметр *n_neighbors* определяет ближайшее количество соседей). Значения соседей усредняются равномерно (все соседи вносят равный вклад в расчет), либо взвешиваться по расстоянию (ближайшие соседи имеют больший вес в расчете). Если в выборке несколько признаков, то для каждого конкретного отсутствующего значения может быть разный набор соседей, в зависимости от того, какой признак рассматривается. Если количество доступных соседей меньше, чем указано в параметре *n_neighbors*, и нет ясных расстояний до обучающей выборки, используется среднее значение для этой функции на основе обучающих данных. Если хотя бы один сосед имеет определенное расстояние, то используется среднее значение оставшихся соседей (взвешенное или невзвешенное). Если определенная функция (признак) всегда отсутствует в обучающих данных, она удаляется в процессе трансформации данных (метод *transform*).

Искусственная нейронная сеть (*artificial neural network, ANN, ИНС*) – это математическая модель, которая имитирует работу нервных процессов, протекающих в головном мозге. Математически нейрон является нелинейной функцией от единственного аргумента – линейной комбинации всех входных сигналов (функция активации) [28].

Механизм работы нейронов лучше представить наглядно на элементарной модели искусственного нейрона – Перцептрон (однослойная нейронная сеть).

Данная модель нейронной сети состоит из 3 видов рецепторов: *S*-элементов, *A*-элементов и *R*-элемента. *S*-элементы – это слой входных данных (рецепторов), который принимает входные данные. Они функционируют как датчики, которые могут находиться в одном из двух состояний: "возбуждение" (активное состояние) или "торможение" (неактивное состояние). Эти рецепторы соединены с *A*-элементами с помощью тормозных или возбуждающих связей. *A*-элементы представляют собой сумматоры с порогом (порог деления в

бинарном состоянии), которые обрабатывают входные сигналы от рецепторов (*S*). Они принимают входы как положительные (возбуждающие связи) или отрицательные (тормозные связи). *A*-элемент возбуждается, если алгебраическая сумма возбуждений, приходящих к нему от рецепторов, превышает его порог. При этом сигнал от рецептора, приходящий по возбуждающей связи, считается положительным, а приходящий по тормозной связи – отрицательным. Сигналы от возбудившихся *A*-элементов передаются в сумматор *R*.

R-элемент – это конечный элемент, который принимает информацию от *A*-элементов и также является пороговым элементом. Он сравнивает сумму весовых коэффициентов входов с заранее установленным порогом. Весовые коэффициенты определяют важность входных данных для данного нейрона. В зависимости от того, превышает ли эта сумма порог, Перцептрон выдает выходное значение – 1 (если порог превышен) или -1 (если не превышен).

$y = f(u)$

$$u = \sum_{i=1}^{n} w_i x_i + w_0 x_0, \quad (13)$$

где $f(u)$ – передаточной функцией (функция активации),

$x_i$, $w_i$ – входные данные и веса на входах нейрона соответственно,

$u$ – функция индуцированным локальным полем,

$x_0$ – дополнительный вход для инициации нейрона,

$w_0$ – дополнительный вес для инициализации нейрона.

Под инициализацией подразумевается смещение активационной функции нейрона по горизонтальной оси, то есть формирование порога чувствительности нейрона [29]. Кроме того, иногда к выходу нейрона специально добавляют некую случайную величину, называемую сдвигом. Сдвиг можно рассматривать как сигнал на дополнительном, всегда нагруженном, синапсе. Таким образом нейронная сеть состоит из нейронов, сгруппированных в слои (*layers*), такие как входной слой, один или несколько скрытых слоев (не в элементарном перцептроне), и выходной слой.

В архитектуре нейронной сети прямого распространения (*Feed Forward Neural Network*) входные данные передаются через слои сети для генерации выходных данных. Выходной слой обычно применяет функцию активации, например *softmax* для классификации или линейную активацию для регрессии. Окончательным результатом работы сети является прогноз или классификации входных данных.

Таким образом нейронная сеть состоит из нейронов, сгруппированных в слои (*layers*), такие как входной слой, один или несколько скрытых слоев (не в элементарном перцептроне), и выходной слой. На первом этапе данные подаются в нейроны входного слоя ($x$ и $y$) и умножаются на соответствующие веса ($w_1$, $w_2$, $w_3$, $w_4$). Полученные произведения складываются. К результату прибавляется смещение (*bias*, в данном случае $b_1$ и $b_2$).

Получившаяся сумма подаётся в функцию активации (*activation function*) для ограничения диапазона и стабилизации результата. Этот результат записывается в нейроны скрытого слоя ($h_1$ и $h_2$).

$h_1 = actfun(w_1 \cdot x + w_3 \cdot y + b_1)$

$h_2 = actfun(w_2 \cdot x + w_4 \cdot y + b_2)$

На втором этапе процесс повторяется для нейронов скрытого слоя ($h_1$ и $h_2$), весов ($w_5$ и $w_6$) и смещения ($b_3$) до получения конечного результата ($r$).

$r = actfun(w_5 \cdot h_1 + w_6 \cdot h_2 + b_3)$

При обучении нейронной сети обучаемые параметры (веса и смещения) корректируются посредством обратного распространения (*back propagation*) ошибки. Таком образом уже зная веса и смещения реализуется процесс оптимизации (нахождение производной) для снижения уровня ошибки результата работы модели нейронной сети. Далее уже с новыми весами повторяется процесс прямого распространения (*forward propagation*), таким образом при обучении модели (количество эпох) нейронной сети данные итерации будут повторяться (алгоритм оптимизации, *SGD*) пока не минимизируется ошибка результата (функция потерь, *loss function*). Для обучения модели нейронной сети применяются данные, разбитые на тренировочный и тестовый наборы.

Существует много видов архитектур искусственных нейронных сетей, каждая из которых специфично подходит под определенный спектр задач. А также можно создать нужную нейросеть используя разные скрытые слои для решения определенной задачи. В частности, для работы с числовой последовательностью для прогноза (на основании предыдущих данных) лучше подходит сеть с долгой краткосрочной памятью (*Long Short-Term Memory, LSTM*) [30-32], для работы с числовыми данными и поиска сложной прямой зависимости используются полносвязные нейронные сети (*Feed Forward Neural Networks*, слой *Dense*), рекуррентные нейронные сети (*Recurrent Neural Network, RNN*) – используются для работы с длинными рядами данных, такими как последовательности текста, сверточные нейронные сети (*Convolutional Neural Networks, CNN*) – используются для машинного зрения и анализа изображений, автоэнкодеры (*Auto-Encoder*) – используются для сжатия данных и их затемнения, это нужно для оптимизации чтобы быстро произвести множество классификаций.

Программная реализация для работы с нейронными сетями глубокого обучения представлена открытой, написанной на языке программирования *Python* библиотекой *Keras*. В библиотеку *Keras* встроены готовые реализации наиболее распространенных типов слоев, таких как полносвязные, сверточные, рекуррентные и другие. Также в библиотеке *Keras* предоставлен доступ к различным алгоритмам оптимизации, функциям активации и другим компонентам, необходимым для

обучения нейронных сетей.

Непосредственно для вменения пропущенных значений специалистами подразделения *Amazon Science* разработана библиотека *DataWig* [33-35], она использует нейронную сеть для заполнения пропусков.

Библиотека *DataWig* представлена основными классами: класс *ColumnEncoder* (перевод в числовые вектора разные типы данных), класс *Featurizer* (определяет конкретный тип данных закодированный в числовой формат и реализует подачу данных в вычислительный граф модели вменения для обучения и прогнозирования). На начальном этапе используются непосредственно слои нейросети: *LSTMFeaturizer* (работает с входными данными, представляющими последовательность символов, используя слои сети *LSTM*), *BowFeaturizer* (использует векторизованные строковые данные), *EmbeddingFeaturizer* (отображает векторизованные категориальные данные (встраивание слов)), *NumericalFeaturizer* (работает с числовыми данными, используя полносвязные слои искусственной нейронной сети (*Feed Forward Neural Networks*, слой *Dense*)). На следующем этапе реализуется основной класс библиотеки *DataWig* – это *SimpleImputer*. Он разворачивает модель вменения, используя предыдущие классы *ColumnEncoder, Featurizer* с гиперпараметрами (можно регулировать) по умолчанию, которые обычно дают хорошие результаты для различных типов наборов данных. Так же класс *SimpleImputer* реализует метод, описанный Липтоном, Вангом и Смолой [35] для обнаружения и исправления смещения меток для категориальных выходных данных (сдвиг метки происходит, когда предельное распределение различается в условиях обучения и производства).

Метод *KNN-MF* разработан нами как гибридная версия контролируемого алгоритма машинного обучения *k-Nearest Neighbour* и алгоритма *Miceforest* с итеративным обходом.

Алгоритм *k-Nearest Neighbour,* предусматривает указание количество *k* ближайших соседей и метрики расстояния между ближайшими объектами исследования (метрики расстояния варьируется в зависимости от типа данных). Пропущенные значения вычисляются на основании метрики расстояния от попавших в область объектов и соответствующих значений этого же атрибута у объектов, математическая реализация представлена формулами 14 и 15. Таким образом с помощью метода *KNN* восстанавливается весь дата фрейм данных. Далее алгоритм итеративно обходит по каждому столбцу при помощи цепных уравнений [36], на данном этапе удаляются значения всего столбца, после чего целевой столбец восстанавливается с помощью метода импутации *Miceforest*, используя для цикла восстановления пропущенных значений (регрессионной модели) данные восстановленные с помощью алгоритма импутации *KNN*.

$$d(x_i, x_j) = \|x_i - x_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^{m}(x_{ik} - x_{jk})^2}, \quad (14)$$

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

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

Вычисление значения пропущенных атрибутов на основании дистанций от попавших в область объектов и соответствующих значений этого же атрибута у объектов:

$$y_k = \frac{\sum_{i-1}^{n} k_i d(x, a_i)^2}{\sum_{i-2}^{n} d(x, a_i)^2}, \quad (15)$$

Где $a_i$ – это $i$ объект, попавший в область,

$k_i$ – значение атрибута $k$ у заданного объекта $a_i$,

$d$ – расстояние до соседнего объекта,

$x$ – новый объект, $xk$ – атрибут нового объекта.

*Miceforest* – это метод множественного вменения *MICE*, в основе которого метод Монте-Карло (представлен формулой 5) и метод случайного леса (для создания модели регрессии). Метод случайного леса (*RF*) является непараметрическим методом, который может работать с разными типами переменных одновременно. Он строит множество деревьев решений и усредняет их результаты для получения окончательных предсказаний. При работе метода *RF* на первом этапе построения модели на тренировочном наборе данных учитывается ошибка неотобранных данных. Затем для каждого объекта эта ошибка усредняется по всему случайному лесу. Основные этапы расчета оценки важности признаков в модели *RF* вычисляется методом *Permutation Feature Importance*, где на первом этапе строится модель на тренировочном наборе данных (для каждого объекта вычисляется ошибка на неотобранных данных), на втором происходит усреднение ошибки по всему случайному лесу, на третьем происходит перемешивание значений признака для всех записей тренировочного набора и на четвертом – снова вычисление ошибки, представлено формулой 16.

$$\text{Importance}(j) = \frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}(Error_{perm}(t, j) - Error_{orig}(t)) \quad (16)$$

Где *TT* – общее количество деревьев в лесу,

Errorperm(*t, j*) – ошибка на неотобранных элементах для дерева *tt* после перемешивания значений признака *jj*,

Errororig(*t*)– ошибка на неотобранных элементах для дерева *tt* до перемешивания значений признака *jj*.

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{b-a}{N}\sum_{i=1}^{N} f(u_i), \quad (17)$$

где $N$ – количество точек равномерно распределенных на $[a, b]$,

$\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} f(u_i)$ – выборочное среднее математического ожидания случайной величины.

Программное решение метода *KNN-MF* написано на языке программирования *Python*, с помощью библиотеки машинного обучения *scikit-learn*, где реализованы классы: *KNNImputer* и класса *IterativeImputer*, а также высокоуровневой библиотеки для

обработки и анализа данных – *Pandas*, в которой реализованы объекты и их методы для работы с массивами структурированных данных такие как: *Series* – это объект, представляющий из себя ассоциативный массив в *DataFrame* (таблице данных) и методы объекта: *df.loc*[''] – доступ к строкам по индексу, *df.reset_index()* – сброс индекса, *df.drop([''], axis='columns')* – удаление столбца, *df.to_csv('filename.csv')* – запись данных в файл, *pd.read_csv('filename.csv', sep=',')* – чтение файла данных и многие другие.

При реализации был использован класс *KNNImputer. KNNImputer* – это метод, который оценивает сходства объектов по функции Евклидового расстояния (чаще всего), где каждый отсутствующий объект рассчитывается с использованием количества соседей возле отсутствующего значения *n_neighbors* и *metric* (метрики расстояния, которая будет использоваться для поиска ближайшего соседа).

Программная реализация метода *Miceforest* представлена библиотекой *Miceforest*. В ней инициализируется объект класса *ImputationKernel*, который использует метод *MICE* для вменения пропущенных значений и метод *complete_data* для получения вмененных данных.

С подобным алгоритмом обхода по столбцам были исследованы и сравнены методы *KNN-MICE, KNN-KNN, KNN-Datawig*.

**Результаты.** Оценка точности и эффективности работы методов вменения пропущенных значений была проанализирована с помощью метода регрессионного анализа – коэффициента детерминации (*R2*), который принимает значение от 0 до 1 и показывает долю объясненной дисперсии объясняемого ряда. Оценка качества регрессионных прогнозов проанализирована с помощью: *RMSE* (это метрика корня квадратного из среднеквадратичного отклонения предсказанных значений от фактических значений, чем ближе значение *MSE* к нулю тем точнее предсказание модели), *MAE* (это средний модуль ошибки также измеряется в той же размерности, что и прогнозируемая величина, но по сравнению с *RMSE MAE* меньше подвержена влиянию выбросов ), *MAPE*(средняя абсолютная ошибка в процентах, показывает на сколько процентов ошибается модель), *D2* (вычисляет долю объясненного отклонения, где лучшее значение ближе к 1). Для оценки качества модели между восстановленными сетами данных использована функция *accuracy_score()* в классе *LogisticRegression*.

При реализации метода импутации *MICE* в объекте класса были установлены гиперпараметры в соответствии с используемым классом *IterativeImputer*, так как он все еще считается экспериментальным функционалом в библиотеке *scikit-learn* и для его реализации требуется указать – *enable_iterative_imputer*. Так как данные не имеют сильных колебаний в значениях было установлено изначальное заполнение пропусков средним значением (*initial_strategy='mean'*), для гиперпараметра (*sample_posterior=True*) установлен true, чтобы после каждой итерации импутации значения выбирались из постериорного распределения, для гиперпараметра – максимальное количество итераций по всем признакам (*max_iter=200*) было выбрано 200, так как с уменьшением до 100 ухудшалась оценка качества модели регрессии (увеличивалась *RMSE* и уменьшалась доля объясненной дисперсии модели $R^2$), критерий остановки, который определяет, насколько изменения между итерациями должны быть малы, чтобы процесс считался сходящимся был выбран (*tol=0.0001*), так при увеличении длительности росла до значения по умолчанию, ухудшалось качество точности модели, а при уменьшении качество точности модели не менялось. Для гиперпараметра (*n_nearest_features=None*) был выставлен показатель *None*, это означает что будут использоваться все признаки ближайших соседей.

Показатель оценки качества регрессионной модели *RMSE* (корень квадратный из среднеквадратичного отклонения между фактическими и прогнозируемыми значениями составил – 0.707, данный показатель ближе к 1 чем к 0, что показывает слабую точность модели), *MAE* (средний модуль ошибки составил – 0.327, что соответствует достаточно высокой точность модели, так как в отличие от средней ошибки *MAE* менее подвержен влиянию выбросов), *MAPE* (процент ошибки модели составил – 0.053, показатель стремится к 0, что соответствует высокой точности модели), *D2* (поясненная доля абсолютной ошибки составила – 0.813, показатель стремится к 1, что соответствует высокому результату модели), коэффициент детерминации *R2* составил – 0.906, что соответствует доли доказанной дисперсии объясняемого ряда, так как показатель стремится к 1, это соответствует возможностью модели в 90% объяснить дисперсию значений, *accuracy_score()* (оценка точности регрессионной модели методом *MICE* – 0.75, данный показатель стремится к 1 что является весьма информативным). График нормального распространения значений признака («*Waist circumference*») и наглядное представление признака во фрейме данных представлены на рисунке 1. В таблице 1 представлены результаты оценки эффективности модели, полученные с использованием метода импутации *MICE*. Значения переменных в методе *MICE* распределены близко к нормальному, но с небольшим отклонением в левую сторону, соответствует тому, что данные распределены недостаточно равномерно с отклонением на $-2\sigma$ от среднего значения $\mu$.

В методе *Miceforest* были выбраны основные гиперпараметры: сохранение всех итераций *save_all_iterations=True* и *random_state=50* (для обеспечения воспроизводимости скрипта, при вызывании одного и тоже скрипта несколько раз). При изменении гиперпараметра от 1-50 (*datasets*, количество наборов данных для множественного вменения) значения оценки качества модели не изменилось, поэтому

был выбран параметр по умолчанию. Показатели оценки качества регрессионной модели: *RMSE* составил 0.826 (данный показатель ближе к 1 чем к 0, что показывает слабую точность модели), *MAE* составил 0.394 (является достаточно информативно, для оценки ошибки модели регрессии), *MAPE* составил 0.075(стремится к 0 что считается весьма информативным), *D2* составил 0.775 (ниже по сравнению с методом *MICE*, но показатель стремится к 1, что соответствует высокому результату точности модели), коэффициент детерминации *R2* составил 0.871 (87% объясненной дисперсии значений модели является хорошим показателем качества модели, хотя и ниже чем в методе *MICE*), *accuracy_score()* (оценка точности регрессионной модели методом *Miceforest* составила 0.72115, что на 0,3 ниже метода *MICE*). Результаты оценки качества модели при реализации метода импутации *Miceforest* представлены в таблице 1. График нормального распространения значений признака *«Waist circumference»* и наглядное представление признака во фрейме данных представлены на рисунке 2.

В методе *Miceforest* значения переменных демонстрируют распределение, достаточно приближенное к нормальному, однако наблюдается легкое искажение: пик расщепляется и сливается, что указывает на то, что данные не распределены достаточно равномерно и имеют отклонение в сторону одного стандартного отклонения ($-\sigma$) от среднего ($\mu$).

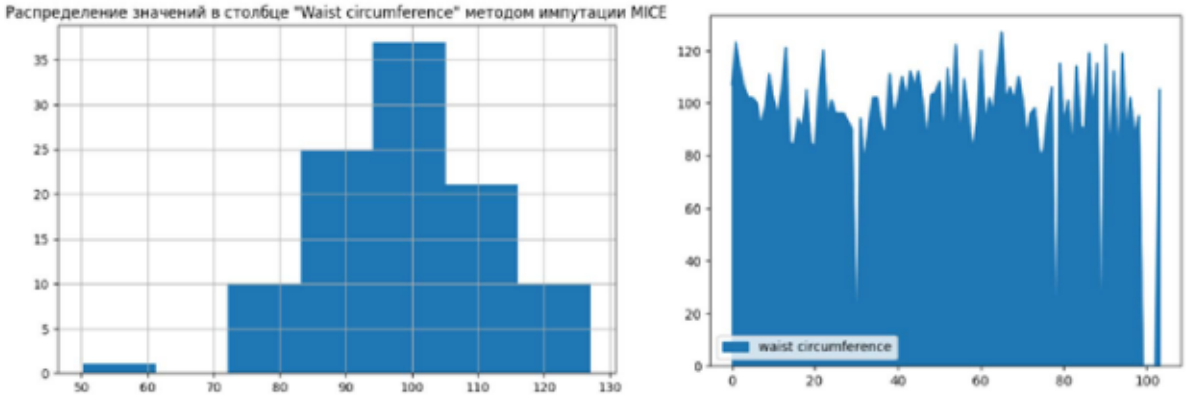



*Рисунок 1 – График нормального распространения значений признака («Waist circumference») и представление признака в наборе данных методом импутации MICE*

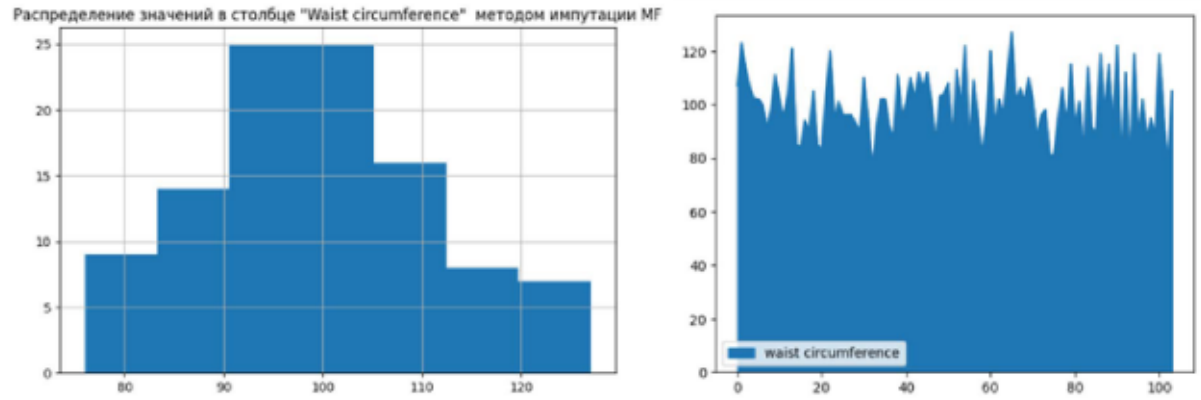



*Рисунок 2 – График нормального распространения значений признака («Waist circumference») и представление признака в наборе данных методом импутации Miceforest*

При исследовании метода импутации *KNN* гиперпараметры к набору предобработанных данных были подобраны эмпирическим путем. Так при увеличении гиперпараметра: *n_neighbors* от 4 до 10 (коэффициент детерминации модели стремился к нулю), при гиперпараметре *n_neighbors* равным 3, показатель точности модели был лучше. Возможно это связано с особенностью входных данных (размером фрейма данных, диапазоном числовых значений и типом данных), а также с особенностью алгоритма, так как характеристики соседей усредняются равномерно или взвешиваются по расстоянию до каждого соседа. Для числовых типов данных подошла метрика Евклидова расстояния, метрика веса каждого значения была выбрана '***ni form***', с тем условием что все объекты в сете и в каждой его части весят одинаково. Метрика *RMSE*, отражающая корень из среднеквадратичной ошибки, достигла значения 0.5. Это указывает на то, что модель обладает средне-удовлетворительной точностью, так как показатель находится ровно посередине по шкале интервала измерения, однако

посравнению с предыдущими методами ошибка точности модели значительно снизилась. Показатель ошибки *MAE* (показатель менее чувствительный к аномальным значениям), измеряющий среднюю абсолютную ошибку, составил 0.192, что свидетельствует о достаточной высокой точности модели. Процентная ошибка *MAPE* составила 0.035, что говорит о высокой точности прогнозов модели. Показатель *D2*, отражающий объясненную долю абсолютной ошибки, достиг 0.89, что свидетельствует о высоком качествредультатах модели. Коэффициент детерминации $R^2$, равный 0.953, демонстрирует, что модель способна объяснить 95% вариативности данных. Оценка точности модели, измеряемая через *accuracy_score()*, составила 0.83654, что является самым высоким показателем точности модели между сравниваемыми методами импутации данных. Результаты, демонстрирующие эффективность модели после применения метода импутации *KNN*, отражены в таблице 2. На рисунке 3 представлены график нормального распределения для признака «*Waist circumference*» и его визуализация в наборе данных. Распределение значений переменных, полученных с помощью метода *MICE*, близко к нормальному.

Результаты оценки качества модели, выполненной с помощью метода импутации *KNN*, приведены в таблице 2.

Был проведен сравнительный анализ гибридных методов импутации, а именно: *KNN-MICE, KNN-MF, KNN-KNN, KNN-Datawig*. Каждый метод был оценен с помощью метрик качества регрессионных прогнозов и метрик статистики. Для каждого гибридного метода были настроены гиперпараметры как в одноименном методе для полного набора данных, так как именно данная настройка имеет эффективный результат к исследуемому набору данных (объему, типу и качеству данных). Для гибридного метода *KNN-Datawig* была использована библиотека машинного обучения *Datawig* (библиотека разработана командой *Amazon Science*, она использует различные типы нейронных сетей, включая сети прямого распространения и рекуррентные нейронные сети, для обработки как категориальных, так и числовых данных). Ввиду того, что использование нейронных сетей требует значительных ресурсов, мы провели анализ эффективности гибридных методов, сосредоточив внимание на процессе восстановления одного столбца данных.

Результаты работы гибридных методов импутации приведены в таблице 3.

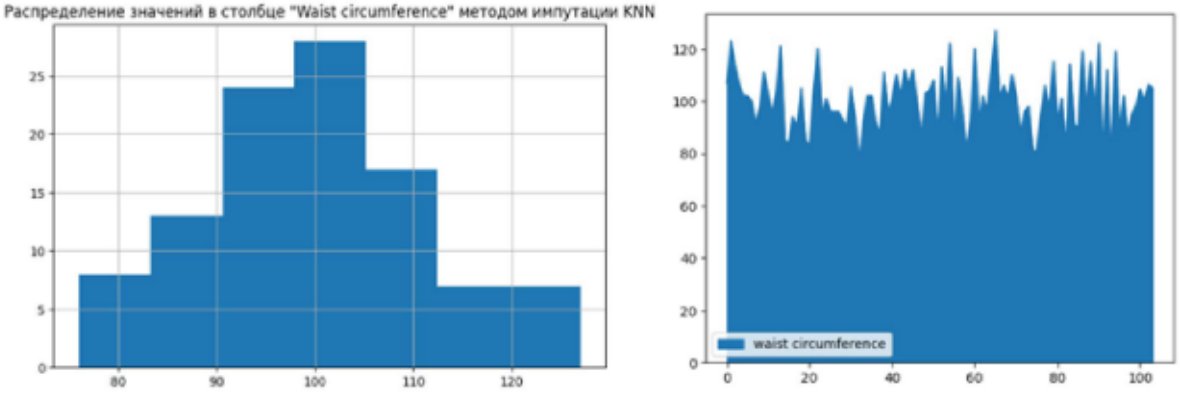



*Рисунок 3 – График нормального распространения значений признака («Waist circumference») и представление признака в наборе данных методом импутации KNN.*

*Таблица 2 – Оценка качества точности модели на всем наборе данных*

| Методы импутации | *RMSE* | *MAE* | *MAPE* | *D2* | *R2* | *accuracy_score* |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *MICE* | 0.707 | 0.327 | 0.053 | 0.813 | 0.906 | 0.75 |
| *Miceforest* | 0.826 | 0.394 | 0.075 | 0.775 | 0.871 | 0.72115 |
| *KNN* | 0.5 | 0.192 | 0.035 | 0.89 | 0.953 | 0.83654 |

*Таблица 3 – Оценка качества точности модели гибридными методами на 1 признаке набора данных*

| Методы импутации | *RMSE* | *MAE* | *MAPE* | *D2* | *R2* | *accuracy_score* |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *KNN-MICE* | 0,5 | 0,212 | 0,032 | 0,879 | 0,953 | 0,808 |
| *KNN-MF* | 0,46 | 0,192 | 0,029 | 0,89 | 0,96 | 0,817 |
| *KNN-KNN* | 0,48 | 0,212 | 0,032 | 0,879 | 0,956 | 0,798 |
| *KNN-DATAWIG* | 0,643 | 0,26 | 0,056 | 0,852 | 0,922 | 0,808 |

**Обсуждение.** При анализе результатов на полном наборе данных, представленных в таблице 1, видно, что метод *KNN* демонстрирует наилучшие показатели оценки качества по всем метрикам модели, включая *RMSE* (0.5), *MAE* (0.192), *MAPE* (0.035), *D2* (0.89), *R2* (0.953) и *accuracy_score* (0.83654). Это свидетельствует о высокой точности и надежности данного метода для импутации данных. Это связано с тем, что метод *KNN* учитывает локальную структуру данных, что позволяет более точно восстанавливать пропущенные значения, особенно в случаях, когда данные имеют сложные зависимости. Однако алгоритм *KNN* чувствителен к зашумленным признакам, в таком случае для его оптимизации применяют эволюционные алгоритмы [37, 38], а также метод *PCA* (метод снижения размерности), настройки гиперпараметра (увеличение числа соседей), использование взвешенного *KNN*. Метод *MICE* также продемонстрировал хорошие результаты, однако уступает методу *KNN* по всем метрикам. Это может быть связано с особенностями алгоритма *MICE*, который использует множественное вменение с помощью цепных уравнений. Алгоритм *MICE* предполагает итеративное вменение пропущенных значений, что может приводить к накоплению ошибок на каждом шаге итерации. Кроме того, *MICE* может быть менее эффективен при наличии сложных зависимостей в данных, так как он предполагает линейные зависимости между переменными [38-41]. В то время как метод *KNN* учитывает локальную структуру данных и не делает предположений о распределении данных, что позволяет ему более точно восстанавливать пропущенные значения. Метод *Miceforest* показал наихудшие результаты среди всех трех методов, по всем показателям оценки качества модели, что может быть связано с особенностями данных и объемом пропущенных значений, так как в работе исследовались данные с не менее 50% пропусков по столбцам признаков. Кроме того, *Miceforest* может быть менее эффективен при наличии сложных зависимостей в данных, так как он предполагает линейные зависимости между переменными.

При анализе результатов, представленных в таблице 3, метод *KNN-MF* [41-43] продемонстрировал наилучшие показатели среди гибридных методов. Он показал наименьшие значения по всем метрикам среднеквадратичной ошибки: *RMSE* (0.46), *MAE* (0.192) и *MAPE* (0.029), а также высокие значения доли объясненного отклонения – *D2* (0.89, где лучшее значение -1), *R2* (0.96) и показатель оценки точности модели составил (accuracy_score) 0.817. Эти результаты свидетельствуют о высокой эффективности и точности данного метода для импутации данных.

Методы *KNN-MICE* и *KNN-KNN* показали схожие результаты с небольшими различиями в значениях метрик. Оба метода продемонстрировали высокую точность и надежность, однако они уступают методу *KNN-MF*.

Метод *KNN-DATAWIG* показал наихудшие результаты среди гибридных методов. Это может быть связано с особенностями алгоритма *Datawig* и его высокой требовательностью к вычислительным ресурсам, так же глубокие нейронные сети могут быть менее эффективным для небольших наборов данных или данных с высокой степенью шума, так как глубокие нейронные сети требуют большого количества данных для обучения, и в случае недостатка данных их производительность может снижаться из-за переобучение нейронной сети (так как сеть «заучивает» небольшой набор данных и поэтому плохо идентифицирует новые данные) на данных небольшого объема. К тому же нейронные сети могут быть слишком сложными для некоторых задач импутации, что может привести к переобучению модели и снижению ее обобщающей способности. Однако, если точность импутации является критически важной, можно рассмотреть использование методов *GAIN* (генеративные состязательные сети (*GAN*) для импутации пропущенных данных) или *MIDA* [44-46], несмотря на их более высокие требования к вычислительным ресурсам.

Результаты данного исследования имеют важное значение для обработки медицинских данных небольшого объема с высоким процентом пропусков в условиях ограниченных вычислительных ресурсов. Особенно это важно для экспресс-анализа новых пациентов, когда созависимость признаков является очень критичной для точного и правильного сбора анамнеза заболевания.

**Выводы.** В ходе исследования был проведен систематический анализ работы методов импутации пропущенных значений, в результате которого были изучены и сравнены основные методы импутации: *MICE* (*Multivariate Imputation by Chained Equations*), *Miceforest* и *KNN* (*K-Nearest Neighbors*). Оценки качества результатов работы основных методов импутации данных позволили выявить их сильные и слабые стороны. По результатам критериев оценки качества модели и метрик статистики был выбран один из методов. При дальнейшем исследовании работы методов импутации пропущенных значений впервые был предложен и разработан новый способ реализации методов импутации в виде гибридных методов, основывающийся на синергитическом влиянии выбранного на первом этапе метода импутации и основных методов (*KNN-KNN, KNN-MICE, KNN-MF, KNN-Datawig*). Для более детального исследования в сравнение методов импутации был добавлен метод импутации, основанный на нейронных сетях (*Datawig*).

Данное исследование показало нам перспективу и практические возможности каждого метода в работе с небольшим набором ККМД с высокой долей пропусков, а также выявило наиболее эффективный метод. При сравнении гибридных методов импутации данных был выбран метод *KNN-MF*,

так как данный метод показал высокие показатели качества и точности модели и метрик статистики.

Таким образом, было предложено использовать и применить на практике метод *KNN-MF* как наиболее точный и эффективный способ восстановления пропущенных значений ККМД с высокой долей пропусков. Этот метод рекомендован в качестве основного метода импутации входных КММД при предобработке данных в модуле рекомендательной системы диагностики заболеваний печени. В перспективе для улучшения метода *KNN-MF* можно использовать подбор оптимальных гиперпараметров с помощью методов (сеточный поиск (*Grid Search*) или случайный поиск (*Random Search*)), трансформировать данные с целью уменьшения доли выбросов, использовать итеративный малоинвазивный подход (отрабатывать данные локально в зависимости от типа и структуры данных), использовать ансамблевые методы импутации данных [47-49], а также использовать дополнительные признаки из состава данных.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Президент Российской Федерации. (2019). Указ от 10 октября 2019 г. №490 «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации». URL: http://publication.pravo.gov.ru/document/view/0001201910110003. (дата обращения: 15.06.2024).

2. 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.

3. Искусственный интеллект в медицине: соотношение обыденного и профессионального понимания / С.С. Стрельников, А.П. Вохминцев, А.Л. Каткова, О.М. Ушакова // Проблемы современного образования. – 2022. – № 6. – С. 55-69. – DOI 10.31862/2218-8711-2022-6-55-69. – EDN DMLQFH.

4. Zliobaite I., Hollmen J. Optimizing regression models for data streams with missing values. Machine Learning. – 2014. – 99(1). – P. 47-73.

5. Hsu H.H., Yang A.C., Lu M.-D. KNN-DTW Based Missing Value Imputation for Microarray Time Series Data // Journal of Computers. – 2011. – Vol. 6. – No. 3. – P. 418-425.

6. Batista G.E.A.P.A., Monard M.C. An Analysis of Four Missing Data Treatment Methods for Supervised Learning // Applied Artificial Intelligence. – 2003. – V. 17. – No. 5-6. – P. 519-533.

7. Troyanskaya O.G., Cantor M.N., Sherlock G., Brown P.O., Hastie T., Tibshirani R., Botstein D., Altman R.B. Missing Value Estimation Methods for DNA Microarrays // Bioinformatics. – 2001. – Vol. 17. – No. 6. – P. 520-525.

8. Zhou J., Huang Z. Recover missing sensor data with iterative imputing network // Workshops 32nd Artif. Intell. (AAAI) Conf., 2018. – P. 209-215.

9. Cao W., Wang D., Li J., et al. BRITS: Bidirectional recurrent imputation for time series // Proc. 32nd Conf. on Neural Inf. Proc. Systems (NeurIPS 2018), Montr´eal, Canada, 2018. URL: https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2018/file/734e6bfcd358e25ac1db0a4241b95651-Paper.pdf (дата обращения: 15.06.2024).

10. Liu Y., Yu R., Zheng S., et al. NAOMI: non-autoregressive multiresolution sequence imputation // Proc. 33rd Int.Conf. on Neural Inf. Proc. Systems (NeurIPS 2019), Vancouver, Canada, 2019. URL: https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2019/file/50c1f44e426560f3f2cdcb3e19e39903-Paper.pdf. (дата обращения: 17.06.2024).

11. Мантрова, А.И. Как пропуски в медицинских данных могут влиять на результаты исследований? / А.И. Мантрова // Научное обозрение. Биологические науки. – 2019. – № 2. – С. 5-9.

12. Seitz C., Lanius V., Lippert S., Gerlinger C., Haberland C., Oehmke F., Tinneberg H.-R. Patterns of missing data in the use of the endometriosis symptom diary. BMC Womens Health. – 2018. – V. 18. – №. 1. – P. 88. DOI: 10.1186/s12905-018-0578-0.

13. Золин П.П. Цензурированнные данные и данные с пропусками в медицинских исследованиях // Патол. физиология и эксперим. терапия. – 2010. – № 4. – С. 49-52.

14. Попова, О.А. Анализ методов векторизации текстовых документов / О.А. Попова // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2023. – № 85. – С. 96-102. – DOI 10.21667/1995-4565-2023-85-96-102. – EDN ZKRUTG.

15. Yadav, Krishan & Soni, Hemant & Pathik, Nikhlesh. (2023). Recommendation System Based on Double Ensemble Models using KNN-MF. International Journal of Advanced Computer Science and Applications. URL: https://www.researchgate.net/publication/371320117_Recommendation_System_Based_on_Double_Ensemble_Models_using_KNN-MF (дата обращения: 18.06.2024).

16. Фабрикант М.С. Модель-ориентированный подход к отсутствующим значениям: множественная импутация в многоуровневой регрессии посредством R (на примере анализа опросных данных) // Социология: методология, методы, математическое моделирование. – 2015. – № 41. – С. 7-29. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_26539204_98997170.pdf (дата обращения: 19.06.2024).

17. Фомина Е.Е. Обзор методов и программного обеспечения для восстановления пропущенных значений в массивах социологических данных // Гуманитарный вестник. – 2019. – № 4. С. 1-12. URL: http://www.hmbul.ru/articles/611/611.pdf. (дата обращения: 19.06.2024).

18. Приказ ROSSTAT от 07.12.2018 N 732 «Об утверждении методологических положений по организации процессов производства официальной статистической информации». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_313411. (дата обращения: 19.06.2024)

19. Chhabra G., Vashisht V., Ranjan J. A Review on Missing Data Value Estimation Using Imputation Algorithm // Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems. 2019. no.11. P. 312-318.

20. Van Buuren, S. and Groothuis-Oudshoorn, K. (2011). mice: Multivariate Imputation by Chained Equations in R. Journal of Statistical Software, 45(3), 1-67.

21. Rubin D.B. (1987). Multiple Imputation for Nonresponse in Surveys. John Wiley & Sons, New York.

22. Соболь И.М. Метод Монте-Карло. – М.: Наука, 1968. – С. 64.

23. Little R.J.A., Rubin D.B. Statistical analysis with missing data. John Wiley & Sons; 2014. – P.408.

24. Iterative Imputer. URL: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.impute.IterativeImputer.html#sklearn.impute.IterativeImputer (дата обращения: 20.06.2024)

25. Оба С., и другие. Байесовский метод оценки пропущенного значения для профиля экспрессии генов данных // Биоинформатика. – 2003. – Том. 19. – С. 2088-2096.

26. Дэниел Дж. Стеховен, Питер Бюльманн. MissForest – непараметрическое вменение пропущенных значений для данных смешанного типа. // Биоинформатика. – 2012. – Том 28. – № 1. – С. 112-118.

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

28. Евклидово пространство. Энциклопедия математики. URL: http://encyclepediaofmath.org/index.php?title=Euclidean_space&oldid=13577 (дата обращения: 20.06.2024)

29. Маккалох Дж., Питтс У. Логические исчисления идей, относящихся к нервной деятельности. // Автоматы. М.: ИЛ, 1956.

30. Ясницкий Л.Н. Введение в искусственный интеллект. – 1-е. – Издательский центр «Академия», 2005. – С. 176.

31. Hochreiter, Sepp; Schmidhuber, Jürgen. "Long Short-Term Memory" // Neural Computation. – 1997. – 9 (8). – P. 1735-1780.

32. Hopfield J.J. "Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities". //Proceedings of the National Academy of Sciences. – 1982. – 79 (8). – P. 2554-2558.

33. Sepp Hochreiter, Jurgen Schmidhuber. LONG SHORT-TERM MEMORY. // Neural Computation. – 1997. – 9(8). – P. 1735-1780.

34. Datawig-missing-value-imputation-for-tables. URL: https://www.amazon.science/publications/datawig-missing-va-

lue-imputation-for-tables (дата обращения: 21.06.2024).
35. Datawig.readthedocs.io. URL: https://datawig.readthedocs.io/en/latest/source/userguide.html (дата обращения: 21.06.2024).
36. Zachary C. Lipton,Yu-Xiang Wang, Alexander J. Smola. Detecting and Correcting for Label Shift with Black Box Predictors. URL: https://arxiv.org/abs/1802.03916?context=cs.LG (дата обращения: 21.06.2024).
37. Schafer J.L. (2003) Multiple imputation in multivariate problems when the imputation and analysis models differ. Statistica Neerlandica. – №57. – P. 19-35.
38. Nigsch, Florian, Bender, Andreas, van Buuren, Bernd, Tissen, Jos, Nigsch, Eduar, Mitchell, John B. O. "Melting point prediction employing k-nearest neighbor algorithms and genetic parameter optimization". // Journal of Chemical Information and Modeling. – 2006. – №46 (6). – P. 2412-2422.
39. Van Buuren, S. "Flexible Imputation of Missing Data". // Chapman and Hall. – 2018.
40. Little R.J.A., & Rubin, D.B. "Statistical Analysis with Missing Data". // John Wiley & Sons. – 2002.
41. Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. "The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction". // Springer. – 2009.
42. Deepak Adhikari, Wei Jiang, Jinyu Zhan, Zhiyuan He, Danda B. Rawat, Uwe Aickelin, and Hadi A. Khorshidi. "Hybrid Imputation Methods for Missing Data in Machine Learning". – 2022.
43. Kim et al. "Evaluation of Imputation Methods for Missing Data in Time Series". – 2019.
44. Felix Biessmann, Tammo Rukat, Phillipp Schmidt, Prathik Naidu, Sebastian Schelter, Andrey Taptunov, Dustin Lange, David Salinas; Datawig: Missing Value Imputation for Tables. – 2019. – №20(175). – P. 1-6.
45. Yoon, J., Jordon, J., & van der Schaar, M. GAIN: Missing Data Imputation using Generative Adversarial Nets. – 2018.
46. Gondara, L., & Wang, K. MIDA: Multiple Imputation using Denoising Autoencoders. – 2018.
47. Li C., Jiang H., Marlin B.M. MisGAN: Learning from Incomplete Data with Generative Adversarial Networks. – 2019.
48. Freund, Y., & Schapire, R.E. "A Decision-Theoretic Generalization of On-Line Learning and an Application to Boosting". // Journal of Computer and System Sciences. – 1997. – №55(1). – P. 119-139.
49. Friedman, J. H. "Greedy Function Approximation: A Gradient Boosting Machine". //Annals of Statistics. – 2001. – №29(5). – P. 1189-1232.

*Статья поступила в редакцию 18.09.2024*
*Статья принята к публикации 13.12.2024*

УДК 004.89
EDN: LHIBZC

# РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ *LMS* С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОВЕРКИ ПРОГРАММНЫХ ЗАДАНИЙ

© Авторы 2024

SPIN: 8289-2240
AuthorID: 902109
ORCID: 0000-0003-4848-8757
**МАРКИН Евгений Игоревич,** кандидат технических наук, доцент кафедры «Программирование»
*Пензенский государственный технологический университет*
*(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11, e-mail: edifiels@penzgtu.ru)*
SPIN: 1425-6743
AuthorID: 1068622
ORCID: 0000-0002-7903-083X
**ЗУПАРОВА Валентина Владимировна,** ассистент кафедры «Программирование»
*Пензенский государственный технологический университет*
*(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11, e-mail: zuparova@penzgtu.ru)*
SPIN: 2964-8134
AuthorID: 741064
ORCID: 0000-0001-5939-7717
**ПАНФИЛОВА Марина Ивановна**, доцент, кандидат химических наук,
доцент кафедры «Общей и прикладной физики»
*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*
*(129337, Россия, город Москва, ул. Ярославское ш., 26, e-mail: 043210@mail.ru)*

**Аннотация.** В статье представлено исследование по проектированию и разработке системы управления обучением (*LMS*), интегрированной с большими языковыми моделями (*LLM*) для автоматизации проверки программных заданий. Целью разработки является улучшение качества обратной связи для обучающихся и сокращение времени проверки работ преподавателями. В основе системы лежит использование отечественных *LLM*, таких как *GigaChat* и *YandexGPT*, а также технологии *Retrieval-Augmented Generation* (*RAG*). Описана архитектура системы, включающая *GitVers* для хранения кода и *GitVerse Actions* для автоматизированного тестирования решений в *Docker*-контейнерах. Интеграция *LLM* позволяет предоставить студентам развернутую обратную связь, что способствует более глубокому пониманию ошибок и повышает качество обучения. В рамках эксперимента продемонстрирована эффективность использования *LLM* для улучшения образовательного процесса. Перспективы дальнейших исследований включают оптимизацию вычислительных ресурсов и расширение возможностей системы для анализа мультимодальных данных.

**Ключевые слова:** система управления обучением, большие языковые модели, автоматизация проверки знаний, *Retrieval-Augmented Generation*, *GigaChat*, *YandexGPT*, цифровизация образования.

# DEVELOPMENT OF AN *LMS* SYSTEM UTILIZING LARGE LANGUAGE MODELS FOR AUTOMATING THE ASSESSMENT OF PROGRAMMING ASSIGNMENTS

© The Authors 2024

**MARKIN Evgeny Igorevich,** candidate of technical sciences,
associate professor of the Department «Programming»
*Penza State Technological University*
*(440039, Penza, Baydukov passage / Gagarina Street, 1a / 11, e-mail: edifiels@penzgtu.ru)*
**ZUPAROVA Valentina Vladimirovna,** assistant of the Department «Programming»
*Penza State Technological University*
*(440039, Penza, Baydukov passage / Gagarina Street, 1a / 11, e-mail: zuparova@penzgtu.ru)*
**PANFILOVA Marina Ivanovna**, associate professor, candidate of technical sciences,
associate professor of the Department of General and Applied Physics
*National Research Moscow State University of Civil Engineering*
*(129337, Russia, Moscow, Yaroslavskoe sh., 26, e-mail: 043210@mail.ru)*

**Abstract.** This paper presents a study on the design and development of a *Learning Management System* (*LMS*) integrated with *Large Language Models* (*LLM*) for automating the assessment of programming assignments. The goal is to enhance the quality of feedback for students and reduce the workload for instructors. The system leverages domestic *LLMs*, such as *GigaChat* and *YandexGPT*, along with the *Retrieval-Augmented Generation* (*RAG*) technology. The architecture includes GitVers for code storage and GitVerse Actions for automated testing of solutions within *Docker* containers. By integrating *LLMs*, the system provides students with detailed feedback, aiding in a deeper understanding of errors and improving the learning process. The experimental results demonstrate the effectiveness of *LLM* integration

for enhancing educational outcomes. Future research directions include optimizing computational resources and extending the system's capabilities to analyze multimodal data.

**Keywords:** learning management system, large language models, automation of knowledge checking, *Retrieval-Augmented Generation*, GigaChat, YandexGPT, digitalisation of education.

*Для цитирования: Маркин Е.И. Разработка системы LMS с использованием больших языковых моделей для автоматизации проверки программных заданий / Е.И. Маркин, В.В. Зупарова, М.И. Панфилова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 4(68). – С. 90-94. – EDN: LHIBZC.*

**Введение.** Современная тенденция к повсеместной цифровизации не обошла стороной и образовательный процесс, по данной теме ежемесячно публикуется множество научных статей, в которых приводится успешный опыт использования современных цифровых технологий, а также геймификации [1]. Применение современных технологий позволяет ускорить процесс получения информации, обмена данными и отчетами между всеми участниками образовательного процесса и тем самым повысить эффективность и качество обучения [2]. Но кроме улучшения качества обучения есть другая востребованная сфера цифровизации образовательного процесса – автоматизация проверки знаний и заданий обучающихся. Автоматизация процесса проверки знаний и заданий позволяет преподавателям существенно сэкономить рабочее время [3], а также улучшить качество оценивания, т.к. при автоматизации процесса пропадает человеческая предвзятость при проверке работ, которая может существенно повлиять на конечную оценку знаний. Самым распространенным методом автоматизации проверки знаний являются различные тесты [4], которые оцениваются в балльной системе и в итоге выдают конечный результат, а также применение методов геймификации, которые позволяют применять цифровой-игровой опыт для автоматизированной проверки знаний в виде игр, которые требуют совершения заранее запрограммированных действий [5].

При проверке заданий, связанных с дисциплинами программирования на данный момент времени применяется два подхода:

– первый это классический ручной подход проверки, когда преподаватель лично проверяет код и отчет студентов. К плюсам данного подхода можно привести качественную обратную связь от преподавателя и подробные объяснения допущенных учеником ошибок, но такой подход является крайне время- и трудо- затратным т.к. требует ручную проверку каждой работы.

– второй подход – это использование современных цифровых технологий для автоматизации проверки заданий студентов [6], данный подход чаще всего строится на современных подходах *CI/CD* для автоматизации запуска решений обучающихся и запуска заготовленных тестов [7]. Данных подход значительно позволяет снизить время для проверки работ, но требует существенных ресурсов и знаний для проектирования, разработки и отладки подобных систем, а также вычислительные ресурсы для запуска и работы системы. Еще одним существенным недостатком является низкое качество обратной связи по решению (чаще всего малоинформативные логи вызова программы и сообщения об ошибках при тестировании программного кода) или вовсе её отсутствие, что не дает полноценного понимания учащимся о том, где и как были совершены ошибки, это приводит к осложнению их поиска и устранению.

Современные системы управления обучением *LMS* (*Learning Management Systems*) позволяют существенно автоматизировать процесс обучения и провести оценку знаний на основе тестирований т.к. это является наиболее универсальным способом оценки знаний учащихся [8]. На данный момент самыми популярными решениями с открытым исходным кодом являются *Moodle*, *Frappe LMS* и *Open edX*. Из данных решений только *Moodle* позволяет при помощи сторонних расширений (например, такого как *CodeRunner*) запускать код для проверки его работы на основе заранее заданных тестов. Но данное решение позволяет только увидеть результаты запуска кода и список верно полученных значений после его запуска, что затрудняет процесс отладки решения и понимания возникших ошибок учеником.

Исследования приводимое в данной статье направлено на проектирование новой *LMS* системы, направленную на автоматизацию проверки решений студентов, изучающих дисциплины связанных с программированием и позволяющую получать развернутую обратную связь по своему решению. Ключевой особенность данной системы является применение больших языковых моделей *LLM* (*large language model*). С момента публикации статьи “Attention Is All You Need” 2017 года [9] началось активное развитие больших языковых моделей, которые обучаются на больших наборах текстовых данных и позволяют производить генерацию текстов крайне схожих с текстом, который может писать обычный человек [10]. Последние 2 года активно идет развитие мультимодальных больших языковых моделей, которые обучаются не только на наборах тестов, но также на программном коде, изображениях и видео позволяют, генерировать и анализировать эти данные. Касательно программного кода такие модели позволяют генерировать программный код, анализировать его, давать комментарии и советы

по его исправлению, на основе таких моделей появились такие программные продукты как *GitHub Copilot, Codeium, Amazon CodeWhisperer, GigaCode, Yandex Code Assistant* и т.д., которые позволяют производить генерацию кода, его анализ и поиск ошибок в современных средах разработки, тем самым облегчая работу программистов.

**Методология.** Внедрение *LLM* в систему *LMS* может существенно улучшить взаимодействие учащегося с автоматизированной системой проверки заданий и оценкой его знаний за счет возможности *LLM* понимать, анализировать и объяснять код. Целью разработки является интеграция *LLM* в *LMS* с целью автоматизации составления расширенной обратной связи на основе присланного решения ученика в виде программного кода и полученного от автоматизированной системы проверки кода результата.

Первым этапом разработки данной системы является проектирование и разработка *LMS* системы, позволяющей проводить полноценное автоматизированное тестирование программных решений обучающихся. Для данной системы были применены современные средства для автоматизации тестирования программного кода, в основе которых находится отечественная система контроля версий *GitVers*, для хранения кода учеников, *GitVerse Actions*, для запуска тестов в *Docker* контейнере и собственная платформа для взаимодействия с *GitVers* и *GitVerse Actions*. Общая схема взаимодействия основных компонентов *LMS* системы представлена на рисунке 1.

Данная структура позволяет учащимся загружать свои решения в *LMS* систему, откуда они выгружаются в систему *GitVers* и встают в очередь на проверку. *GitVerse Actions* постепенно берет задачи, загружает из во внутрь *Docker* контейнера, при необходимости проводит компиляцию кода и запускает набор тестов. Результаты проверки *GitVerse Actions* отправляет обратно в *LMS* систему, и ученик видит результат в виде успешного выполненного задания или логи с сообщениями об ошибке.

Интеграция *LLM* происходим путем технологии *RAG*, которая позволяет добавить новые знания в языковую модель из различных документов. Интеграция *LLM* в данную *LMS* систему происходит следующим образом (рис. 2):

– ответ от тестирующей системы поступает на “обработчик ответа”;

– “обработчик ответа” собирает дополнительную информацию в виде текста урока, задания и решения ученика;

– “обработчик ответа” отправляет в *LLM* всю собранную информацию, вместе с ответом от тестирующей системой и промптом;

– ответ от *LLM* поступает в “обработчик ответа”, который далее передает ответ ученику.

Данная цепочка действий позволяет передать большой дополнительный массив данных в *LLM*, не переобучая её и *LLM* знает контекст, в котором нужно выдавать ответ и дает развернутые ответы. В рамках системы интеграции языковых моделей используются такие отечественные *LLM* как *GigaChat, YandexGPT*, характеристики моделей представлены в таблице 1.

*GigaChat* является разработкой исследовательского подразделения компании Сбер, представляющая собой большую языковую модель, оптимизированную для русскоязычного сегмента [11-14]. Модель обучалась на большом корпусе текстов, включая литературные произведения, научные статьи, новостные материалы и Интернет-дискуссии на русском языке. Основное преимущество *GigaChat* заключается в высокой степени понимания русскоязычного контекста и способности генерировать информативные ответы на широкий спектр вопросов.

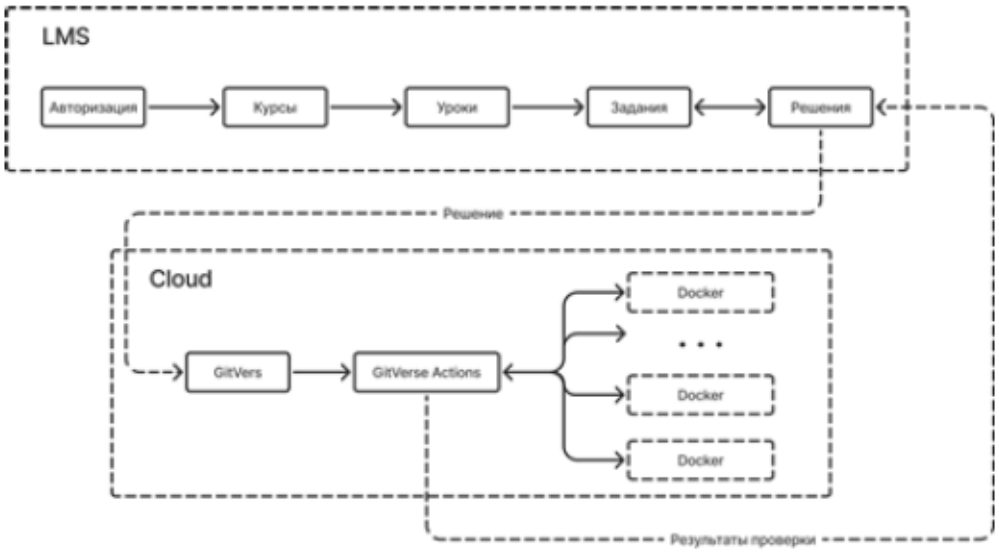



*Рисунок 1 – Архитектура LMS системы с автоматизированной системой проверки программного кода ученика*

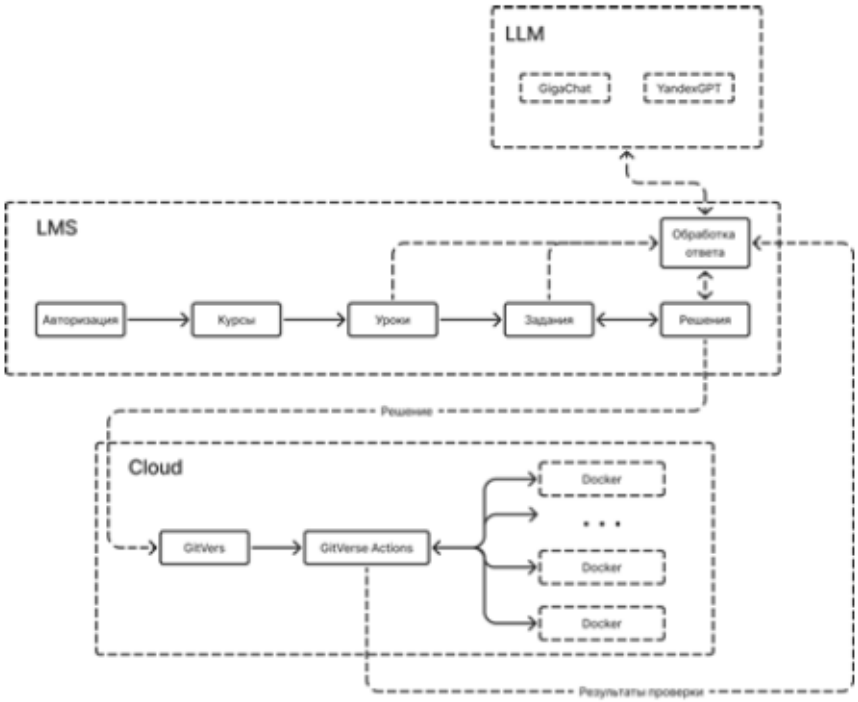



*Рисунок 2 – Архитектура LMS системы с автоматизированной системой проверки программного кода ученика и интеграцией LLM + RAG*

*Таблица 1 – Характеристики языковых моделей*

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

*YandexGPT* разработана компанией Яндекс, основанная на архитектуре *Generative Pre-trained Transformer* (*GPT*) [15-19]. Модель обучена на обширном наборе данных, включая тексты из интернета, литературу и специализированные базы знаний. Модель эффективно справляется с задачами на понимание текста и генерацию ответов, имеет хорошую адаптацию к русскоязычным данным, интегрирована в ряд сервисов компании и может быть дополнительно дообучена под конкретные задачи, но предоставляемы инструменты для дообучения не позволяют обучить модель новым знаниям.

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

**Результаты.** В ходе проведенного исследования была разработана *LMS* система с модулем автоматизированной проверки заданий и с интеграцией *LLM*. Применение *LLM* совместно с *RAG* в разработанной *LMS* системе позволяет ученикам получать расширенную обратную связь на основе результатов тестирования кода.

На рисунках 3 и 4 представлены примеры ответа системы без использования *LLM* и с использованием *LLM* соответственно.

На рисунке 3 показан стандартная лог-информация от системы проверки решения, а на рисунке 4 можно увидеть пример развернутой обратную связи созданную *LLM*, которая состоит из пояснения задания, анализа допущенных ошибок, советов по их исправления и ссылок на лекционные материалы для повторения.

Данная система была протестирована на студентах Пензенского государственного технологического университета. Эксперимент показал, что средний балл студентов на контрольных работах повысился на 15% после внедрения системы, а количество ошибок, связанных с неправильным пониманием заданий, уменьшилось на 30%. Применение *LLM* совместно с *RAG* в разработанной *LMS* системе позволяет ученикам получать быструю и качественную расширенную обратную связь на основе результатов тестирования кода.

Для проведения эксперимента была разработана архитектура *LMS* системы с использованием *GitVers* для хранения решений учеников и *GitVerse Actions* для автоматизированного тестирования решений. Тестирование кода осуществляется в *Docker*-контейнерах для повышения безопасности запуска кода, а также для возможности запускать различные конфигурации для разных заданий. Результаты проектирования и работы системы демонстрируют потенциал интеграции *LLM* для улучшения автоматизированной обратной связи при проверке программных заданий, а также возможность более углублённой интеграции *LLM* в *LMS* системы и образовательный процесс.

**Обсуждение.** Проведенное исследование показало, что интеграция *LLM* в *LMS* системы позволяет повысить качество обратной связи по сравнению с существующими решениями, основанными на классических методах тестирования. В отличие от традиционных подходов, где обратная связь ограничивается сообщением об ошибках и результатами выполнения тестов, новая система предоставляет детализированные пояснения к ошибкам на основе анализа контекста задания, учебных материалов и предоставленного решения ученика.

Сравнение с другими *LMS* показало, что использование *LLM*, таких как *GigaChat* и *YandexGPT*, значительно улучшает взаимодействие обучающихся с системой и ускоряет процесс понимания ошибок. При этом отечественные модели демонстрируют высокую адаптацию к русскоязычному контенту и эффективную генерацию развернутых комментариев к программным решениям.

**Выводы.** По результатам исследования была разработана *LMS* система с модулем автоматизированной проверки заданий и с интеграцией *LLM*, что позволяет существенно улучшить качество обратной связи для обучающихся и сократить время на проверку работ преподавателями.

Перспективы дальнейших исследований включают:

– оптимизацию использования вычислительных ресурсов при интеграции *LLM*;

– расширение возможностей системы за счет использования мультимодальных моделей для анализа не только кода, но и других типов данных (например, изображений);

– разработку методик для улучшения качества обратной связи на основе пользовательских данных и адаптивного обучения моделей.

Развитие таких систем позволит повысить эффективность образовательного процесса и улучшить навыки студентов в области программирования, что особенно актуально в условиях цифровой трансформации высшего образования.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Широколобова А.Г. Геймификация в условиях цифровой трансформации образования // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Психолого-педагогические науки. – 2022. – Т. 19, № 1. – С. 5-20.

2. Мазелис А.Л. Геймификация в электронном обучении // Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. – 2013. – № 1. – С. 85-90.

3. Шаврина Т.О. Текст и знание в аспекте больших языковых моделей // Философские науки. – 2023. – № 4. – С. 45-60.

4. Григорьев С.Г., Иванова Т.В. Применение больших языковых моделей в образовательном процессе // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 10: Инновационная деятельность. – 2024. – № 1. – С. 15-25.

5. Кузнецова Е.В., Петрова А.С. Роль геймификации в цифровой трансформации образования: опыт и перспективы // Научный альманах. – 2024. – № 4. – С. 198-209.

6. Иванов И.И., Смирнова О.П. Влияние языковых моделей, основанных на искусственном интеллекте, на систему образования РФ в ближайшем будущем // Вестник Московского государственного университета. Серия 20: Педагогическое образование. – 2023. – № 2. – С. 30-45.

7. Петров П.П., Сидорова Н.Н. Генеративный искусственный интеллект в образовании: анализ тенденций и перспектив // Образовательные технологии и общество. – 2023. – Т. 26, № 2. – С. 15-30.

8. Соколова М.В., Кузьмин А.А. Перспективы и риски внедрения геймификации в современном образовании // Педагогическое образование в России. – 2023. – № 5. – С. 45-55.

9. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A.N., Kaiser Ł., Polosukhin I. Attention Is All You Need // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2017. – Vol. 30. – P. 5998-6008.

10. Иванова Т.В., Смирнов Д.С. Геймификация в современном образовательном процессе // Вестник Томского государственного педагогического университета. – 2023. – № 3. – С. 60-70.

11. Шаврина Т.О. Специфика лингвистического исследования функционирования больших языковых моделей // Вестник Белгородского государственного университета. Серия: Гуманитарные науки. – 2024. – № 2. – С. 85-95.

12. Петрова А.С., Иванов И.И. Методы геймификации в образовании // Молодой ученый. – 2023. – № 52 (499). – С. 135-136.

13. Сидоров Н.Н., Кузнецова Е.В. Тенденции геймификации в образовательных коммуникациях цифрового общества // Вестник Московского государственного университета. Серия 20: Педагогическое образование. – 2023. – № 3. – С. 88-95.

14. Иванов И.И., Смирнова О.П. Увеличение точности больших языковых моделей с помощью расширенной поисковой генерации // Вестник Московского государственного университета. Серия 20: Педагогическое образование. – 2023. – № 4. – С. 100-110.

15. Петров П.П., Сидорова Н.Н. Геймификация и нарративные практики в современном образовании // Вестник Уральского федерального университета. Серия 1: Проблемы образования, науки и культуры. – 2022. – № 3-4. – С. 85-95.

16. Кузнецова Е.В., Петрова А.С. Геймификация образования в высшей школе: принципы и оценка эффективности // Вестник Высшей школы экономики. – 2022. – № 5. – С. 110-120.

17. Иванова Т.В., Смирнов Д.С. Большие языковые модели в лингвистике и лингводидактике // Вестник Московского государственного университета. Серия 20: Педагогическое образование. – 2024. – № 1. – С. 15-25.

18. Петров П.П., Сидорова Н.Н. Применение больших языковых моделей в образовательном процессе // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 10: Инновационная деятельность. – 2024. – № 1. – С. 15-25.

19. Соколова М.В., Кузьмин А.А. Геймификация в электронном обучении // Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. – 2013. – № 1. – С. 85-90.

*Статья поступила в редакцию 18.11.2024*
*Статья принята к публикации 13.12.2024*

УДК 004.75
EDN: LJXGYU

# ПРОБЛЕМЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОБРОВОЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ НА ОСНОВЕ КРАУДСОРСИНГА КОНЕЧНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ

© Автор(ы) 2024

SPIN: 4322-4367
AuthorID: 1266111
ORCID: 0000-0002-4709-7298

**АНДРОПОВ Андрей Васильевич**, аспирант
*Университет ИТМО*
*(197101, Россия, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А., e-mail: andropov@itmo.ru)*

SPIN: 8068-4206
AuthorID: 820994
ORCID: 0000-0002-1754-7120
ScopusID: 57205166082

**ДЕРГАЧЕВ Андрей Михайлович**, кандидат технических наук, доцент,
доцент факультета программной инженерии и компьютерной техники
*Университет ИТМО*
*(197101, Россия, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А., e-mail: amd@itmo.ru)*

SPIN: 1713-2003
AuthorID: 272528
ORCID: 0000-0002-7594-5020
ResearcherID: I-7634-2016
ScopusID: 57191329632

**БЕЛОЗУБОВ Александр Владимирович,** кандидат технических наук,
доцент факультета программной инженерии и компьютерной техники
*Университет ИТМО*
*(197101, Россия, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А., e-mail: belozubov@itmo.ru)*

SPIN: 5872-1104
AuthorID: 1264928
ORCID: 0000-0003-1866-7914

**ГУРЬЯНОВА Аглая Геннадьевна**, кандидат технических наук,
доцент факультета программной инженерии и компьютерной техники
*Университет ИТМО*
*(197101, Россия, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А., e-mail: agilina@itmo.ru)*

**Аннотация.** Представлен обзор современного состояния исследований и развития систем в области добровольных вычислений (англ. *Volunteer computing*). Проанализировано текущее состояние вычислительных устройств, их типы, количество и мощности. Проведен сравнительный анализ технических и функциональных характеристик вычислительных устройств разных типов. Выделены основные области применения больших объемов вычислительных ресурсов. Результаты анализа показали, что в мире существует большое количество устройств, вычислительные ресурсы которых используются не полностью. Объединение вычислительных устройств в единую систему позволяет задействовать простаивающие ресурсы для решения ресурсоемких вычислительных задач без потери качества обслуживания. Но при этом есть проблемы интеграции с облачными сервисами, организации процесса вычислений и создания зависимых задач. Для того чтобы такая система стала актуальной в современном мире, требуется решить эти проблемы. Перспективные области применения данной системы – это научные исследования и цифровые предприятия. На основании полученных выводов сформулированы требования к вычислительной инфраструктуре для организации добровольных вычислений на основе краудсорсинга конечных устройств пользователей и определены актуальные направления для дальнейших исследований в данной области.

**Ключевые слова:** вычислительные устройства, облачные сервисы, характеристики вычислительных устройств, цифровые предприятия, добровольные вычисления, краудсорсинг, интернет-вещей.

# EFFICIENCY PROBLEMS OF VOLUNTARY COMPUTING BASED ON CROWDSOURCING OF USER END-DEVICES

© The Author(s) 2024

**ANDROPOV Andrey Vasilyevich**, post-graduate student
*ITMO University*
*(197101, Russia, St. Petersburg, Kronverksky ave., 49, lit. A., e-mail: andropov@itmo.ru)*
**DERGACHEV Andrey Mikhailovich**, candidate of technical sciences, associate professor

*ITMO University*
*(197101, Russia, St. Petersburg, Kronverksky ave., 49, lit. A., e-mail: amd@itmo.ru)*
**BELOZUBOV Alexander Vladimirovich**, candidate of technical sciences, associate professor
*ITMO University*
*(197101, Russia, St. Petersburg, Kronverksky ave., 49, lit. A., e-mail: belozubov@itmo.ru)*
**GURYANOVA Aglaya Gennadievna**, candidate of technical sciences, associate professor
*ITMO University*
*(197101, Russia, St. Petersburg, Kronverksky ave., 49, lit. A., e-mail: agilina@itmo.ru)*

**Abstract.** This article presents an overview of the current state of research and development in volunteer computing systems. The current landscape of computing devices is analyzed, focusing on types, quantities, and computational capacities. A comparative analysis is conducted to assess the technical and functional characteristics of different device types. Key application areas for large volumes of computational resources are identified. The results show that a significant number of devices worldwide are underutilized in terms of their computational resources. Integrating these devices into a unified system allows the use of idle resources to address resource-intensive computational tasks without compromising service quality. However, challenges remain regarding integration with cloud services, the organization of computational processes, and the creation of dependent tasks. Addressing these issues is essential for such systems to be viable in today's world. Promising application areas for this system include scientific research and digital enterprises. Based on these findings, the article formulates requirements for computing infrastructure to facilitate volunteer computing through crowdsourcing of end-user devices and outlines key directions for further research in this field.

**Keywords:** computing devices, cloud services, characteristics of computing devices, digital enterprises, volunteer computing, crowdsourcing, internet of things.

*Для цитирования: Андропов А.В. Проблемы эффективности добровольных вычислений на основе краудсорсинга конечных вычислительных устройств пользователей / А.В. Андропов, А.М. Дергачев, А.В. Белозубов, А.Г. Гурьянова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 4(68). – С. 95-110. – EDN: LJXGYU.*

**Введение.** Опираясь на последние исследования глобальной датасферы [1], можно отметить, что темп роста объемов данных увеличивается с огромной скоростью (прогнозируется рост вплоть до 175 зеттабайт к 2025 году). Ускоренное увеличение объемов данных также влечет за собой увеличение числа устройств, которые обрабатывают данные. На сегодня в мире существует огромное количество разнообразных вычислительных устройств, начиная от умной лампы и заканчивая распределенными дата-центрами. И все эти устройства могут взаимодействовать через сеть интернет, как показано на рисунке 1, что дает огромный потенциал в интеграции их друг с другом и использовании их мощностей для обработки данных. Такой потенциал начали замечать ещё в прошлом веке советские учёные [2], а в дальнейшем применили на практике разработчики таких исследовательских проектов, как *Distributed.net* и *GIMPS*. Вместо того чтобы использовать дисковое пространство и мощности централизованных суперкомпьютеров, они предложили использовать сотни миллионов распределенных персональных компьютеров и игровых консолей для сложных и ресурсоемких вычислительных задач – поиска простых чисел и подбора ключей к криптографическим шифрам. Хотя количество подключенных устройств на то время составляло около сотни, эти проекты принесли положительные результаты, показав, что даже не слишком большое количество персональных вычислительных устройств может сравниться с суперкомпьютерами, а сами проекты продолжаются по сегодняшний день. Все это дало развитие новой вычислительной парадигме, получившей название «*Public-resource computing*» или «*Global Computing*», или «*Peer-to-peer computing*». Следующими исследованиями в этой области стали проект по анализу радиосигналов *SETI@home* и открытая платформа для организации распределенных вычислений *BOINC* [3]. Это первый такой проект, который широко освещался в средствах массовой информации. Уже к 2004 году количество устройств в проекте превысило миллион, а его общая мощность составляла более 70 терафлопс [4], что было почти в два раза больше, чем самые мощные на тот момент суперкомпьютеры, а платформа *BOINC* позволяла и другим исследователям создавать собственные проекты для вычислений, давая возможность пользователям выбирать проекты на этой платформе. На сегодняшний день распределенные вычисления поставили следующие рекорды пиковой мощности – мощность сети *Folding@home* составляла 2.3 экзафлопс, вся мощность сети платформы *BOINC* составляла около 31 петафлопс и мощность проекта *GIMPS* поддерживала единовременно около 1,354 терафлопс. Такие результаты сравнимы с современными суперкомпьютерами и дата центрами, что говорит об актуальности исследований и существующем потенциале этой области.

Стоит также отметить, что у единственной открытой платформы для организации распределенных вычислений присутствует ряд проблем [5].

1. Проблемы с созданием новых проектов в такой системе, так как нет никаких гарантий, что

планируемые расчеты когда-нибудь начнутся и закончатся. Волонтеры, готовые принять участие в добровольных вычислениях, сами выбирают проекты, в которых они хотят участвовать, а новые проекты их не завлекают. В итоге развиваются и наращивают мощность только популярные проекты. Сейчас уже существует механизм ключевых слов позволяющий подписаться не на конкретный проект, а на целую область, к примеру медицина или астрономия.

2. Нет интеграции с существующими системами высокопроизводительных вычислений (англ. *High-Throughput Computing*). Такие системы предполагают использование большого количества ресурсов на протяжении большого количество времени. Частично реализует функционал *BOINC*, а именно распределение задач и отслеживания доступных ресурсов.

3. Проблема длительной архивации данных. В любой момент любой волонтер может покинуть проект, а вместе с ним исчезнут и несохраненные данные. Существует разбиение на чанки (англ. *Chunk*), но это нагружает сеть, так как для восстановления файла требуется собрать все его части на одном устройстве.

4. Неполная гетерогенность. Система не умеет запускаться на *IOS*, игровых консолях и использовать Интернет вещей (англ. *Internet of Things*), хотя и поддерживает большое количество архитектур и платформ.

5. Не поддерживаются архитектурные нововведения. Последние процессорные архитектуры позволяют создавать анклавы – области в виртуальном адресном пространстве, защищенные от чтения и записи извне этой области другими процессами, включая ядро операционной системы. Использование таких областей может сделать возможным отказ от дополнительной валидации результатов. Если один узел посчитал задачу, то его результат не обязательно сравнивать с результатами от других узлов, потому что никто физически не смог бы подделать такой результат. Дополнительно эти области позволяют использовать вычисления очень чувствительной информации, к примеру данные пациентов.

6. Отсутствует способ привлечения и удержания волонтеров. Не так много кому интересно просто так отдавать свой компьютер для вычислений, несмотря на то, что существуют кредиты, выдаваемые за вычисления в такой системе (используются при расчете предоставления задач на вычисление). Был скачок популярности на волне блокчейна из-за того, что система позволяет легко организовать виртуальную валюту и любую систему с *proof-of-work* вычислениями. Сейчас популярность заметно спала.

7. Отсутствует реализация сложных зависимых вычислений, поддержка вычислений с низкой задержкой и учет расписания работы конечных устройств (так например, если устройство по расписанию выключается в 00:00, то система может не учесть это, отправив задачу на выполнение в 23:59).

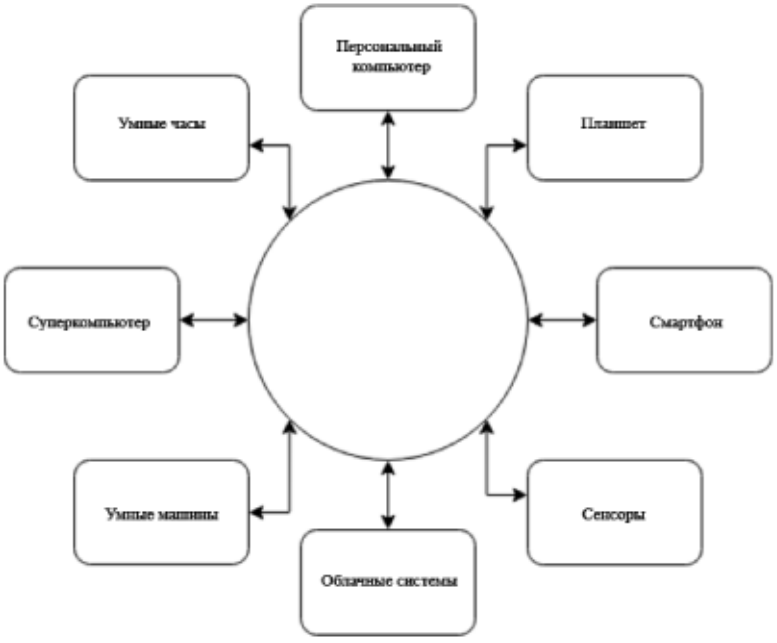



*Рисунок 1 – Устройства, подключенные к сети интернет*

**Методология.** Цель работы – оценить перспективы создания глобальной краудсорсинговой инфраструктуры для привлечения конечных вычислительных устройств пользователей к участию в наукоемких вычислительных проектах на основе добровольной саморегистрации устройств и лизинговой политики использования потенциала совокупных вычислительных мощностей. Для достижения поставленной цели необходимо.

1. Провести аналитический обзор вычислитель-

ных устройств, подключенных к сети интернет, и исследовать их возможности по предоставлению своих вычислительных ресурсов.

2. Оценить проблемы краудсорсинга конечных устройств пользователей и сформулировать возможные стратегии усовершенствования современных систем добровольных вычислений.

3. Определить основные области применения таких систем и разработать гибкие политики привлечения волонтеров.

4. Сформулировать возможные стратегии усовершенствования современных систем добровольных вычислений с целью повышения эффективности использования вычислительных ресурсов конечных устройств и их интеграции с облачными системами.

5. Сформулировать основные идеи, которые позволили бы привлечь интерес *IT*-сообщества к развитию, внедрению и широкому использованию таких систем на основе глобальной краудсорсинговой инфраструктуры.

Вычислительные устройства можно разбить на следующие категории – конечные устройства, персональные устройства и облачные системы. Конечные устройства в основном представляют собой узкоспециализированные устройства, не требующие сложных вычислений. Те из них, которые реализуют обмен информацией друг с другом и внешней средой, попадают под концепцию интернета вещей (англ. *Internet of Things, IoT*) [6-8]. Такое взаимодействие позволяет совместно использовать вычислительные ресурсы конечных устройств для создания единой информационной системы и организации распределенных вычислений. Если такую систему организовать в пределах сети вычислительных устройств, то есть не используя облачные технологи, то такая парадигма будет называться граничными (периферийными) вычислениями (англ. *edge computing*) [9-11]. Такие вычисления позволяют организовать вычислительную систему, не прибегая к взаимодействию через интернет. Каждое устройство находится в локальной сети, занимается расчетом небольшой задачи и хранит полученные результаты у себя. Затем эти данные собираются в единое целое. Добавление возможности коммуникации между целыми системами граничных вычислений с помощью облачных технологий расширяет парадигму распределенных вычислений до туманных вычислений (англ. *fog computing*) [7]. В отличие от граничных вычислений при туманных вычислениях устройства больше взаимодействуют через интернет.

Персональные вычислительные устройства предоставляют более широкий спектр возможностей по сравнению с конечными устройствами. К ним относятся такие устройства, как персональные компьютеры, смартфоны, игровые консоли, смарт-телевизоры. При объединении таких устройства в единую вычислительную систему по аналогии с конечными устройствами получаем грид-вычисления (англ. *grid computing*) [12], которые предоставляют собой взаимодействие гетерогенных слабосвязанных компьютеров, работающих вместе для выполнения различных задач. Из объединения таких вычислительных кластеров образовываются дата-центры (центры обработки данных, ЦОД) [13].

К оставшимся устройствам вычислительной экосистемы относятся облачные вычисления [14]. Они объединяют все перечисленные вычислительные парадигмы, а облачные технологии позволяют предоставить прозрачный для пользователя интерфейс для обработки и хранения данных, как будто он взаимодействует с единым устройством. Такие технологии предоставляют облачные провайдеры, к которым можно отнести *Microsoft Azure, Amazon Web Services, Google Cloud, DigitalOcean* и многих других.

Обобщенно архитектура вычислительной экосистемы изображена на рисунке 2. Такая архитектура позволяет использовать любое вычислительное устройство, подключенное к системе, практически без какой-либо настройки. Вся настройка происходит на этапе добавления устройства в облачную систему, что во многом замедляет появление большего количества облачных систем. Воспользовавшись результатами исследований, предоставленных компанией *Cisco* [15], можно оценить процентное соотношение подключенных к интернету устройств в прогнозе на 2025 год (рис. 3). Общее количество устройств будет составлять около 29 миллиардов.

На диаграмме заметно очевидное превалирование конечных устройств и персональных устройств по сравнению с остальными устройствами. Но это не означает, что большая часть всей информации обрабатывается на конечных устройствах. Так одна облачная система может легко заменить тысячи и десятки тысяч конечных устройств, но уже сотни тысяч таких устройств могут превзойти облачные системы. Все зависит от сферы применения той или иной распределенной системы, а также от их функциональных возможностей. По данной диаграмме можно также сделать вывод, что большинство устройств не задействуются в обработке больших данных, но это не говорит о слабой эффективности обработки.

Для оценки производительности устройств необходимо выделить общую метрику для всех типов устройств. Обычно для этих целей используют единицу, которая показывает сколько операций с плавающей точкой выполняет данное вычислительное устройство или иначе *FLOPS* (англ. *FLoating-point OPerations per Second*). Для проведения такой оценки требуется выполнить тестовую программу, которая подсчитает время выполнения операций в секунду. Такая проверка подойдет не всем категориям устройств. Так в конечных устройствах может не быть возможности запустить тестовую программу ввиду отсутствия операционной системы, либо же вообще отсутствовать возможность работы с числами с плавающей точкой из-за архитектурных особенностей. Несмотря на то, что облачные системы

оперируют не одним устройством, а большим множеством устройств, для них уже существуют измерения производительности [16], но все же для охвата большего количества разнотипных устройств следует проводить оценку мощности устройств в ваттах [17]. На малых количествах устройств такое сравнение было бы не совсем точным из-за того, что самое мощное устройство не всегда самое производительное [18]. Однако, так как создание устройств, которые будут потреблять большое количество энергии и обладать слабой производительностью, экономически не выгодно, то усредненные результаты, представленные на рисунке 4, хорошо демонстрируют количественные различия в производительности между разными категориями устройств.




*Рисунок 2 – Вычислительная экосистема*




*Рисунок 3 – Самые распространённые устройства, подключённые к сети интернет*

Проанализировав две последние диаграммы можно сделать вывод, что дата-центры в среднем в сотни раз производительнее остальных устройств, но суммарная производительность у них ниже. При этом далеко не вся мощность дата-центров доступна для пользования. Все зависит от свободы доступа к вычислительным ресурсам, которая определяется моделью обслуживания вычислительных устройств [19]. Из статистики следует, что 99% всех дата-центров участвует в работе облачных сервисов [20]. Это позволяет приравнять дата-центры и облачные системы.

Существует четыре модели обслуживания, представленные на рисунке 5. Чем правее столбец, тем меньше контроля (ячейки, выделенные оранжевым цветом) над обозначенными ресурсами есть у пользователя, а работу с ними автоматически выполняет вычислительная система.

Модели обслуживания относят к формам облачных вычислений, но саму идею разбиения контроля над ресурсами устройств можно распространить на другие вычислительные устройства, управление которыми осуществляется удаленно.

Программное обеспечение как услуга (англ. *Software-as-a-Service, SaaS*) – это модель, в которой потребителю предоставляется возможность использования прикладного программного обеспечения провайдера, работающего в облачной инфраструктуре и доступного с различных клиентских устройств или посредством тонкого клиента, например браузера, или посредством интерфейса программы [21, 22].

Контроль и управление основной физической и виртуальной инфраструктурой облака, в том числе сети, серверов, операционных систем, хранения, или даже индивидуальных возможностей приложения осуществляется облачным провайдером.

Платформа как услуга (англ. *Platform-as-a-Service, PaaS*) – модель, когда потребителю предоставляется возможность использования облачной инфраструктуры для размещения базового программного обеспечения для последующего размещения на нем новых или существующих приложений [22, 10]. В состав таких платформ входят инструментальные средства создания, тестирования и выполнения прикладного программного обеспечения, системы управления базами данных, связующее программное обеспечение, среды исполнения языков программирования, предоставляемые облачным провайдером. Контроль и управление основной физической и виртуальной инфраструктурой облака, в том числе сети, серверов, операционных систем, систем хранения, осуществляется облачным провайдером, за исключением проприетарного программного обеспечения, разработанного и/или установленного пользователем, а также параметров конфигурации среды выполнения.




*Рисунок 4 – Средняя мощность вычислительных устройств*

| On-Premises | Infrastructure as Service | Platform as Service | Software as Service |
|---|---|---|---|
| Приложения | Приложения | Приложения | Приложения |
| Данные | Данные | Данные | Данные |
| Среда выполнения | Среда выполнения | Среда выполнения | Среда выполнения |
| Промежуточное ПО | Промежуточное ПО | Промежуточное ПО | Промежуточное ПО |
| Операционная система | Операционная система | Операционная система | Операционная система |
| Виртуализация | Виртуализация | Виртуализация | Виртуализация |
| Сервера | Сервера | Сервера | Сервера |
| Хранилище данных | Хранилище данных | Хранилище данных | Хранилище данных |
| Сеть | Сеть | Сеть | Сеть |

*Рисунок 5 – Модели обслуживания*

Инфраструктура как услуга (англ. *Infrastructure-as-a-Service, IaaS*) предоставляется как возможность использования облачной инфраструктуры для самостоятельного управления ресурсами обработки, системами хранения, сетями и другими фундаментальными вычислительными ресурсами [24]. Например, потребитель может устанавливать и запускать произвольное программное обеспечение, которое может включать в себя операционные системы, системное и прикладное программное обеспечение. Потребитель может контролировать операционные системы, виртуальные системы хранения данных и установленные приложения, а также обладать ограниченным контролем за набором доступных

сетевых сервисов (например, межсетевым экраном, *DNS*). Контроль и управление основной физической и виртуальной инфраструктурой облака, в том числе сети, серверов, типов используемых операционных систем, систем хранения, осуществляется облачным провайдером.

Коробочная версия продукта (англ. *On-premises, Desktop as service*) устанавливается и работает на компьютере физического лица или организации, использующих программное обеспечение, а не на удаленном вычислительном устройстве, таком как кластер или облако. Пользователь может контролировать все ресурсы устройства без ограничения.

Каждая отдельная модель обслуживания определяет какие ресурсы устройства будут доступны, а какие будут всегда использоваться управляющей системой. Таким образом, даже не выполняющее никаких значимых для пользователя вычислений устройство будет потреблять ресурсы для поддержания тех слоев, которые требует модель обслуживания (рис. 5).

На основании исследования, посвященного потреблению мощностей различных уровней моделей обслуживания [25], можно определить примерный процент доступной мощности.

На основании данных (рис. 4 и 6) можно определить значения доступной пользователю мощности для каждого вида устройств. Можно точно сказать, что большинство конечных устройств можно отнести к модели *On-premises,* так как они предоставляют полный спектр возможностей самого устройства. Это значит, что при удаленном подключении пользователь будет получать в использование все ресурсы устройства, что эквивалентно всем мощностям устройства. Персональные же устройства берут на себя ответственность за поддержание таких вещей, как операционная система, хранилища данных, виртуализация, поэтому их можно отнести к уровню *IaaS*.

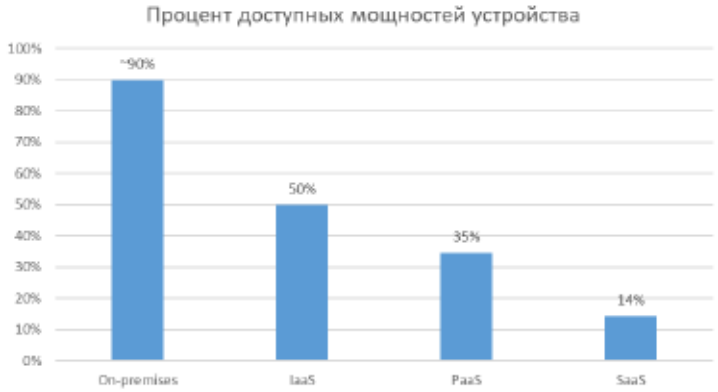



*Рисунок 6 – Процент доступных мощностей в зависимости от модели обслуживания*




*Рисунок 7 – Средняя минимальная доступная мощность*

Количество подключенных устройств к сети интернет показывает, что устройства каждого региона вполне способны предоставить мощности сопоставимые с мощными дата-центрами, при условии, что они будут работать вместе как единая вычислительная система [15]. Помимо использования вычислительных мощностей немаловажную роль играет программное обеспечение и технические характеристики устройств, так как два устройства с одинаковой мощностью (в ваттах) могут по-разному справляться с одной вычислительной задачей, что определяется архитектурными различиями и установленным программным обеспечением.

**Результаты.** Все рассмотренные трансформации с данными были проделаны ради того, чтобы иметь возможность количественно сравнить разные категории устройств (рис. 7). Это дает возможность приблизительно оценить сколько разного вида уст-

ройств достаточно, чтобы заменить любое другое устройство. Так один дата-центр представляет собой 97300 персональных устройств (~0.00002% от общего количества устройств) и 432444 конечных устройства (~17.37% от общего количества устройств). Следует также понимать, что количество устройств отличается от региона к региону, а в случае с обработкой данных это может быть критично, так как увеличивает время на пересылку данных.

Полученное приближение сделано с допущением, что при оценке и последующем сравнении устройств не производится учет характеристик процессоров, накладных расходов операционной системы, потребления ресурсов на фоновые задачи, работу приложений. Эти факторы особенно важны для персональных устройств, поскольку значительная часть их мощности расходуется на обслуживание операционной системы, пользовательских процессов и энергосберегающие задачи.

Очевидно, что в дата-центре такие расходы будут сравнительное меньше. Поэтому точные методы оценки доступной вычислительной мощности, которую можно было бы получить в предлагаемой инфраструктуре, требуют более детализированного подхода. Основание для оценочных формул можно найти в ряде исследований, которые детально анализируют использование ресурсов и накладные затраты на разных уровнях вычислительных устройств [26, 27].

Формула для оценки доступной тактовой частоты *CPU* адаптирована на основе работы [26], которые исследуют нагрузку операционной системы и фоновую активность устройств:

$$Available\ CPU\ Power\ (GHz) = C \times f \times (1 - U_{sys} - U_{bg}),$$

где:

$C$ – количество доступных ядер процессора;

$f$ – тактовая частота ядра (в ГГц);

$U_{sys}$ – доля вычислительных ресурсов, занятая системой (обычно 10-25% для ПК, смартфонов и *IoT*-устройств [27, 28]);

$U_{bg}$ – нагрузка, вызванная пользовательскими фоновыми приложениями (в среднем 10-30% для смартфонов и планшетов на основании тестов и статистики использования [27]).

Похожий подход применяется для оценки доступной оперативной памяти (*RAM*), так как значительная её часть также занята системными процессами и фоновыми приложениями. Формула для оценки объёма доступной памяти [26] выглядит следующим образом:

$$Available\ RAM = M \times (1 - R_{sys} - R_{bg}),$$

где:

$M$ – общий объём оперативной памяти;

$R_{sys}$ – процент памяти, занятой операционной системой (обычно 10-20% для ПК, 20-25% для мобильных устройств и до 30% для *IoT*-устройств [27]);

$R_{bg}$ – память, используемая фоновыми приложениями (около 15-25%).

Эти значения были экспериментально определены в исследованиях, посвящённых анализу энергопотребления и ресурсной загрузки мобильных и настольных устройств [27].

Перевод вычислительных ресурсов в *FLOPS* позволяет оценить мощность устройств для выполнения ресурсоёмких операций с плавающей запятой. Для вычисления *FLOPS* используются данные о тактовой частоте и характеристиках процессора, что даёт возможность напрямую сравнивать устройства разного класса. На основе исследования [28] была предложена следующая формула для расчёта *FLOPS*:

$$Available\ FLOPS = Available\ CPU\ Power\ (GHz) \times IPC \times (1/CPI)$$

где:

*IPC* (*Instructions Per Cycle*) – среднее количество инструкций, выполняемых процессором за такт. Например, для смартфонов средний показатель составляет около 1.5-2, для планшетов и ПК среднего уровня – 2-3, для высокопроизводительных ПК – около 4 [30].

*CPI* (*Cycles Per Instruction*) – количество циклов на одну инструкцию. Для большинства мобильных устройств значение составляет около 1.5-2, для ПК – 1-1.5 [26].

В таблице 1 приведены характеристики доступных вычислительных ресурсов для различных классов устройств. Характеристики различных типов устройств, такие как количество ядер *CPU*, тактовая частота и объём ОЗУ, взяты из отчётов об оборудовании и технических спецификаций, таких как данные *AnanTech* и ре-сурса *Notebookcheck*. Значения для *System Usage* и *Background Usage* были установлены на основе эмпирических исследований [26, 27]. Для *IoT*-устройств были использованы результаты исследования [31].

Таблица 1 иллюстрирует результаты расчётов, показывая значительные различия в доступной вычислительной мощности между устройствами. ПК высокого класса превосходят по производительности все остальные устройства, тогда как смартфоны и планшеты обеспечивают значительно меньшие значения. Однако, при объединении нескольких миллионов устройств можно достичь вычислительной мощности, сравнимой с суперкомпьютером или крупным дата-центром.

Современные дата-центры и суперкомпьютеры обладают вычислительной мощностью, измеряемой в петафлопсах (*PFLOPS*) и даже экзафлопсах (*EFLOPS*), где *1 PFLOPS = 1,000,000 GFLOPS*. Для того чтобы понять, как совокупная мощность разнородных устройств может сравниться с мощностью дата-центров, необходимо вычислить, сколько устройств каждого типа потребуется для достижения уровня в *1 PFLOPS*.

Используя данные таблицы 1, можно рассчитать количество устройств каждого типа, необходимых для достижения *1,000,000 GFLOPS*. Результаты расчетов представлены в таблице 2.

*Таблица 1 – Сравнительная характеристика вычислительной мощности различных типов устройств.*

| Тип устройства | Ядра CPU | Частота CPU (ГГц) | Использование системы | Фоновое использование | Доступная мощность CPU (ГГц) | Доступные FLOPS (GFLOPS) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Смартфон (low-end) | 2 | 1.5 | 25% | 35% | 1.20 | 0.90 |
| Смартфон (middle-end) | 4 | 1.8 | 20% | 30% | 3.60 | 3.60 |
| Смартфон (high-end) | 8 | 2.5 | 15% | 20% | 13.00 | 21.67 |
| Планшет (low-end) | 2 | 1.4 | 25% | 30% | 1.26 | 0.95 |
| Планшет (middle-end) | 4 | 2.0 | 20% | 25% | 4.40 | 4.40 |
| Планшет (high-end) | 8 | 2.5 | 15% | 20% | 13.00 | 21.67 |
| ПК (low-end) | 4 | 2.5 | 15% | 20% | 6.0 | 6.0 |
| ПК (middle-end) | 8 | 3.0 | 10% | 15% | 18.0 | 36.00 |
| ПК (high-end) | 16 | 3.5 | 5% | 10% | 53.20 | 212.80 |
| IoT | 1 | 0.8 | 30% | 30% | 0.28 | 0.14 |

*Таблица 2 – Необходимое количество устройств различных типов для достижения суммарной производительности в 1,000,000 GFLOPS.*

| Тип устройства | Доступные GFLOPS | Необходимое количество устройств для достижения 1,000,000 GFLOPS |
|---|---|---|
| Смартфон (low-end) | 0.90 | ≈ 1,111,111 устройств |
| Смартфон (middle-end) | 3.60 | ≈ 277,778 устройств |
| Смартфон (high-end) | 21.67 | ≈ 46,136 устройств |
| Планшет (low-end) | 0.95 | ≈ 1,052,632 устройств |
| Планшет (middle-end) | 4.40 | ≈ 227,273 устройств |
| Планшет (high-end) | 21.67 | ≈ 46,136 устройств |
| ПК (low-end) | 6.00 | ≈ 166,667 устройств |
| ПК (middle-end) | 36.00 | ≈ 27,778 устройств |
| ПК (high-end) | 212.80 | ≈ 4,702 устройств |
| IoT устройство (типичное) | 0.14 | ≈ 7,142,857 устройств |

Таким образом, и приближенная оценка и более точная показывают целесообразность и перспективность разработки предлагаемой инфраструктуры с целью получения большой суммарной вычислительной мощности путем объединения различных вычислительных устройств в единое целое.

Опираясь на исследования [32], перечислим наиболее важные для вычислений технические и функциональные характеристики устройств [33, 34] – характеристики, которые выражаются в числовых значениях и/или которые можно формально определить [35].

*Модель обслуживания.* Модель обслуживания – *SaaS, PaaS, IaaS* и *On-premises* [18] – позволяет быстро определить устройства, которые не удовлетворяют потребностям пользователя.

*Регион.* Регион – это привязанность конкретного устройства к его географическому положению. От региона зависит задержка передачи данных до конкретного вычислительного устройства. Нахождение устройств в одном регионе ускоряет передачу данных по сравнению с ситуацией, когда устройства разбросаны по всему миру [36]. В тех случаях, когда скорость передачи не играет большой роли, местоположением можно пренебречь. Распределение устройств по регионам продемонстрировано на рисунке 8.

*Задержка (англ. latency) и пропускная способность (англ. Throughput).* Эти два показателя определяют насколько эффективно система может справляться с поставленной задачей. Задержка – это время, необходимое для выполнения какого-либо действия или получения результата. Пропускная способность – это количество операций или результатов в единицу времени. Они зависят от многих показателей в системе – производительности, архитектуры системы и других функциональных характеристик. В общем случае следует стремиться к достижению максимальной пропускной способности при допустимых задержках. Так как заранее нельзя определить задачу, которая будет выполняться, то эти параметры нужно рассчитывать в ходе работы системы, что будет влиять на надежность конкретного узла. То есть, если устройство не справляется со своей задачей, то пропускная способность будет уменьшаться, а задержки расти. В таком случае лучшим вариантом будет отказаться от использования этого устройства.

*Доступность (англ. availability), консистентность (англ. consistency) и устойчивость к разделению (англ. partition tolerance).* Это динамические характеристики, строящиеся на основе времени работы вычислительного устройства. Исходя из *CAP* теоремы [37] в распределенной системе гарантировать можно только две характеристики из трех:

1) консистентность – каждое чтение возвращает актуальные данные или ошибку;

2) доступность – каждый запрос возвращает результат без гарантий, что результат содержит последние данные;

3) устойчивость к разделению – система должна функционировать, несмотря на потери ресурсов, узлов или каких-либо других ошибок коммуникации между сервисами.

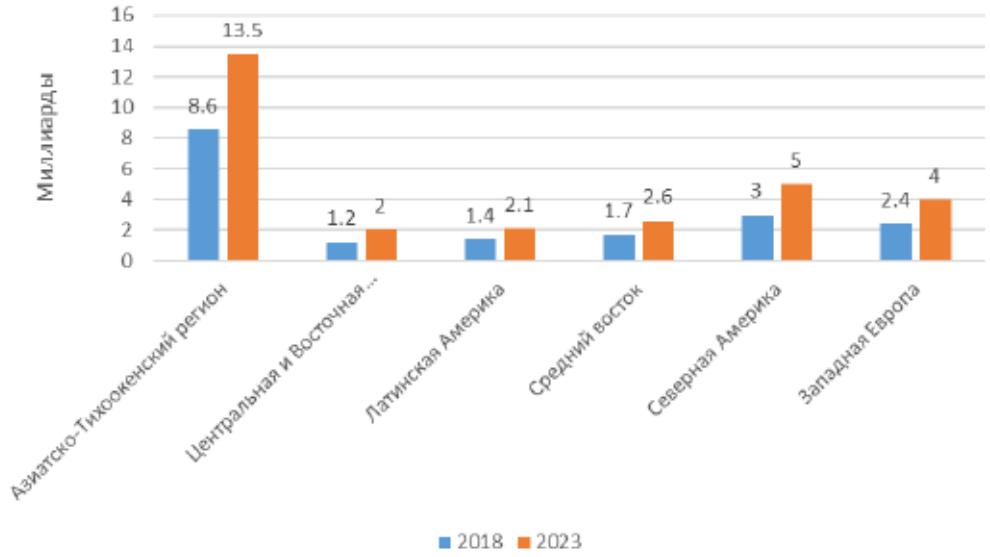



*Рисунок 8 – Распределение устройств по регионам*

Сеть интернет не является надежной, поэтому необходимо всегда поддерживать устойчивость к разделению. Следует достигать некоторого компромисса между консистентностью и доступностью данных. Возможны следующие варианты такого компромисса.

*Консистентность + устойчивость к разделению (англ. consistency and partition tolerance, CP).* В такой системе в результате ожидания ответа от узла можно получить ошибку истечения времени ожидания (англ. *timeout*). Такой подход отлично подходит для систем, в которых требуется соблюдение атомарности операций. Например, транзакций в банке. Нельзя купить что-то, не успев пополнить счет. Для организации системы, основанной на таком подходе, необходимо использоваться транзакционную модель, например, блокчейн.

*Доступность + устойчивость к разделению (англ. availability and partition tolerance, AP).* Ответы возвращают наиболее свежие данные, доступные узлу, но они могут быть не самыми свежими в целом. Запись данных в распределенных системах занимает некоторое время (необходимо сделать множество копий между несколькими базами данных), поэтому данные могут появиться не сразу. Это подходит системам, бизнес-логика которых допускает частичную консистенцию. Также этот подход хорош для систем, которые должны продолжать функционировать вне зависимости от внешних ошибок.

Если процесс вычисления состоит из нескольких шагов, подверженных сбоям, то общая доступность службы зависит от того, выполняются эти шаги последовательно или параллельно.

*Производительность (англ. performance).* Это количественная характеристика скорости выполнения определенных операций на компьютере. Чаще всего вычислительная мощность измеряется во флопсах, а также производными от нее.

Существует некоторая сложность при определении вычислительной мощности. Во-первых, следует иметь в виду, что производительность системы может сильно зависеть от типа выполняемой задачи. В частности, отрицательно сказывается на вычислительной мощности необходимость частого обмена данными между составляющими компьютерной системы, а также частое обращение к памяти. В связи с этим выделяют пиковую вычислительную мощность – гипотетически максимально возможное количество операций над числами с плавающей запятой в секунду, которое способно произвести данное устройства. Оценка производительности обычно проводится при помощи специальных тестов – набора программ предназначенных для проведения вычислений и измерения времени их выполнения.

*Функциональные возможности.* Так как каждое устройство, находящееся в системе, имеет свой набор функций, то такие возможности также важно перечислить.

1. Хранение данных. В соответствии с особенностями хранения данных на конкретном устройстве системы хранения данных разделяются на следующие категории [36-40]: файловые хранилища; виртуальных диски; объектные хранилища; долговременные хранилища; гибридные.

2. Базы данных. Базы данных позволяют хранить данные в структурированном виде, что упрощает работу с данными. Выделяют следующие категории баз данных [41]: реляционные; не реляционные; для работы с временными рядами; резидентные.

3. Сервисы миграции. Определяют наличие возможности производить различные виды миграций с одного вычислительного узла на другой. Обычно миграции подразделяются на следующие виды [36-40]: миграции серверов; миграция данных небольших объемов (до петабайтов); миграция данных больших объемов (петабайты и выше).

4. Маршрутизация. Наличие балансировщика

нагрузки и распределения данных по собственным вычислительным ресурсам [44].

5. Аварийное восстановление. Есть ли возможность восстановления данных в случае непредвиденной ошибки, есть ли внутреннее резервирование [45].

6. Безопасность. При работе через сеть интернет поднимается проблема безопасности данных, поэтому наличие средств для обеспечения безопасности является обязательной для облачных систем и для любых других удаленных вычислительных систем. Какое шифрование применяются для защиты данных, есть ли защита от *DDoS* атак, использование *SSL* и т. п. [46, 47].

**Обсуждение.** Подводя итоги проведенного исследования необходимо отметить, что уровень компьютеризации и цифровизации современного общества чрезвычайно высок, и количество персональных вычислительных устройств, находящихся в распоряжении пользователей, продолжает расти. Вычислительных ресурсов каждого устройства в отдельности достаточно для выполнения задач, под которые оно проектировалось. Но развитие аппаратных и программных средств на сегодняшний день таково, что даже небольшие конечные устройства, устройства интернета вещей или встраиваемые вычислительные системы имеют значительный запас вычислительной мощности и зачастую загружены неполностью, а то и значительное время просто простаивают без какой-либо вычислительной нагрузки. Современное развитие Интернет позволяет объединять в единую сеть практически все вычислительные устройства с различной архитектурой и программным обеспечением, а уровень алгоритмизации распределённых вычислений и наличие соответствующих программных средств позволяет создавать как локальные, так и глобально распределенные вычислительные системы для реализации масштабных вычислительных проектов. И такие системы существуют, например *BOINC*, но имеют ограничения в части гибкости и оперативности реализации на их базе новых ресурсоемких проектов и возможности динамически перестраивать цепочки устройств, задействованных в вычислениях. Такие проекты необходимо сопровождать «вручную», что добавляет к указанным недостаткам еще и человеческий фактор.

Решением проблемы указанных ограничений могла бы стать глобально распределенная программная инфраструктура для организации добровольных вычислений, поддерживаемая как интернет-провайдерами, так и пользователями сети Интернет. Готового решения по созданию конкретно такой инфраструктуры нет, но есть опыт создания других глобально распределенных специализированных систем. Пример реализации глобально распределенной интернет-ориентированной инфраструктуры – система доменных имен (англ. *Domain Name System, DNS*), которая не только значительно изменила, но и составляет основу функционирования сети Интернет.

Для создания такой программной инфраструктуры необходимо разработать концептуальную модель, отражающую общие принципы функционирования и порядок взаимодействия конечных устройств с элементами инфраструктуры. Также необходимо исследовать возможные варианты привлечения конечных устройств к добровольным вычислениям и варианты взаимодействия конечных устройств в рамках ресурсоемких вычислительных проектов.

В условиях неопределенности состояния конечных устройств пользователей в сети Интернет, а также учитывая их количество, предлагается использовать принцип самоорганизации на базе сервис-ориентированной архитектуры – саморегистрации конечных устройств в инфраструктурных элементах типа реестров и подтверждения их доступности на основе лизинговой политики, под которой в данном контексте понимается модель временного предоставления вычислительных ресурсов на гибких условиях, определяющих сроки использования и объем предоставляемых ресурсов. Учитывая характер взаимодействия устройств в основном через Интернет каждое устройство может быть представлено в такой сервис-ориентированной инфраструктуре встроенным в конечное устройство веб-сервисом. Следовательно можно говорить о показателях качества обслуживания веб-сервисов применительно к задаче выбора из множества конечных устройств тех устройств, которые в большей степени соответствуют требованиям вычислительного проекта. Для разработки и реализации модели прогнозирования и оценки показателей качества обслуживания с учетом требований пользователей к выполняемой конечным устройством функции необходимо иметь методы агрегирования показателей качества обслуживания, методы вероятностной оценки, а также средства применения данной модели при формировании проектно-ориентированной системы распределенных вычислений.

Для повышения надежности процессов обработки данных, с учетом промежуточного состояния веб-сервиса конечного устройства, необходима гибкая стратегия выбора отказоустойчивой композиции и адаптивные алгоритмы ее реконфигурации.

На рисунке 9 представлена общая схема самоорганизации конечных устройств в единую краудсорсинговую систему добровольных вычислений.

Алгоритм организации распределенной обработки информации в такой системе может быть представлен следующей последовательностью пошаговых действий.

1. Регистрация устройств. Устройства, желающие участвовать в системе, проходят процесс регистрации, предоставляя информацию о своих технических характеристиках, доступных ресурсах и о своём поддерживаемом программном обеспечении. Архитектура системы предполагает, что она будет распределённой, чтобы сделать её более гибкой и

не хранить информацию об устройствах и вычислениях централизовано.

2. Постоянное обновление статуса готовности. Зарегистрированные устройства регулярно отправляют на сервер информацию о своей готовности к участию в вычислениях, текущей загрузке и доступных ресурсах, чтобы поддерживать информацию о своём существовании и об изменениях своих ресурсов. На основе этого также можно рассчитывать определённые метрики, например доступность устройства. Следующий этап зависит от цели, с которой устройство подключилось к системе. Это может быть безвозмездное предоставление своих ресурсов, не требующего ничего взамен, тогда всегда будет выполняться шаг 6 или же использование чужих ресурсов, тогда переходим на шаг 3. Стоит также отметить, что устройство может как выполнять чужие запросы на обработку данных, так и формировать свои собственные, в этом случае шаг 3 и шаг 6 могут выполняться одновременно.

3. Отправка задач. Устройство формирует запрос на получение ресурсов для выполнения некоторой задачи. Если задача слишком большая, то она может разбиваться на мелкие.

4. Подбор устройств. Система должна подобрать из всех зарегистрированных устройств такой набор устройств, который будет способен выполнить поставленную задачу. Для подбора используются сведения, которые были получены на шаге 2.

5. Распределение задач. На выбранные устройства отправляются задания на выполнение. Для выполнения одной задачи не обязательно использовать только одно устройство, можно разослать задачу множеству устройств, чтобы повысить шанс выполнения задачи путем избыточности.

6. Выполнение подзадач. Каждое устройство выполняет свою подзадачу локально. Устройства периодически проверяют, не перегружены ли они внешними вычислениями, и при необходимости регулируют приоритеты, чтобы задачи краудсорсинга выполнялись без ущерба для основных функций устройства.

7. Агрегация результатов. Центральная система собирает частичные результаты, отправленные устройствами, агрегирует и валидирует их для получения общего решения. В зависимости от качества результата можно поощрять устройство, повышая его приоритет при выполнении новых задач.

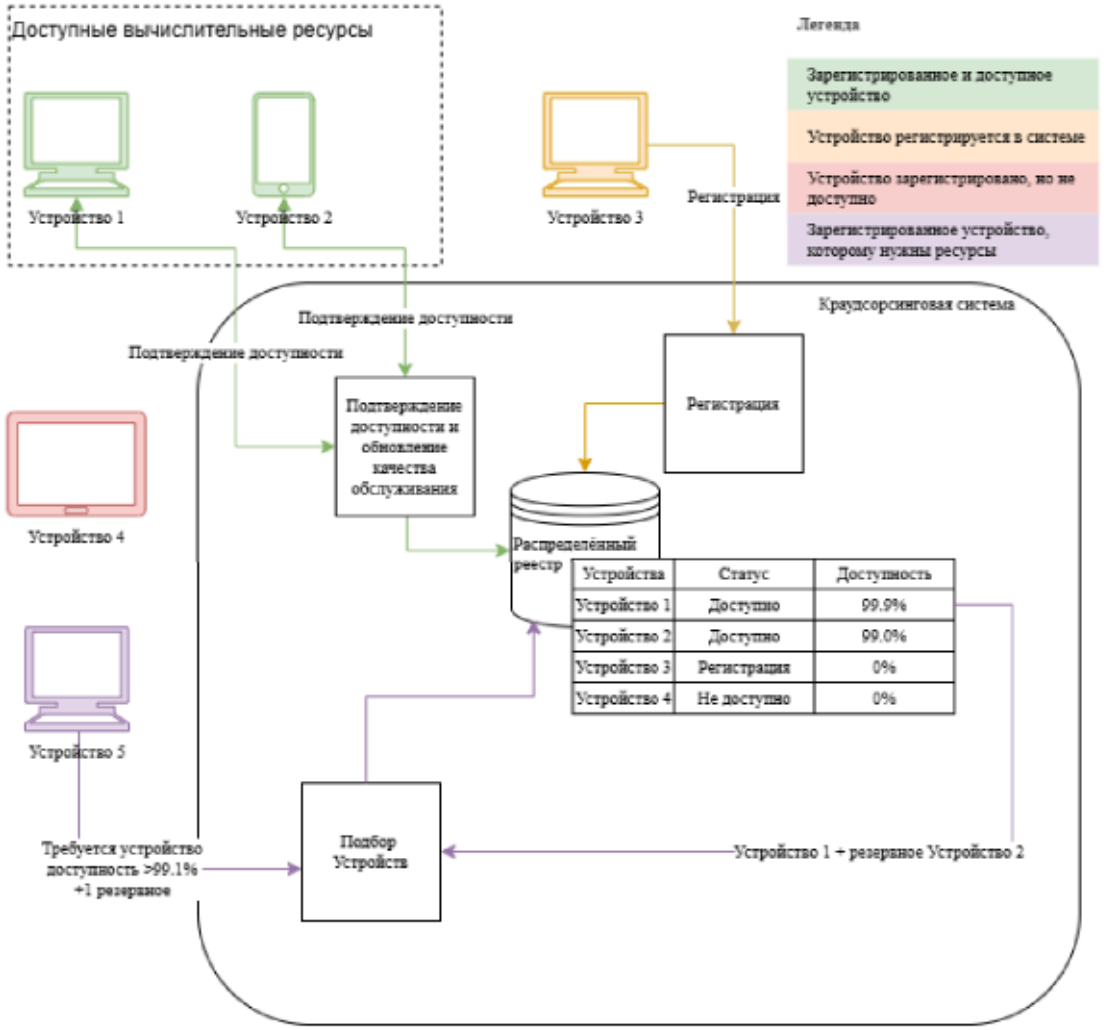



*Рисунок 9 – Обобщенная схема самоорганизации конечных устройств в системе краудсорсинга*

При условии дублирования этапов расчетов на многих устройствах и создания гибкой системы поощрения добровольного подключения устройств, такая система может оказаться перспективнее существующих систем добровольных вычислений, таких как система *BOINC* [4], так как:

– пользователи не будут иметь возможность выбирать в каких проектах участвовать, то есть использовать предоставляемые мощности сможет любой проект, не зависимо от популярности и сферы применения;

– для организации распределенных вычислений будут применяться самые современные методы и решения в части разбиения задач на подзадачи, резервирования результатов и т. д.;

– все пользователи будут иметь возможность в той или иной степени задействовать вычислительную систему также и для решения своих вычислительных задач, что может являться дополнительным стимулом, наряду с реализацией системы поощрений добровольного участия пользователей в проектах.

При этом важно включить в такое взаимодействие устройств и облачные системы, что позволит решить существующие проблемы облачных систем [48].

Одна из важных задач реализации такой системы состоит в том, чтобы максимально абстрагироваться от устройства или системы, на которой происходит вычисление, делая сам процесс максимально унифицированным. Разработка такой инфраструктуры для реализации распределенных вычислений на базе краудсорсинга потребует решения ряда задач.

1. Разработка API и интерфейсов для интеграции с облачными сервисами и системами высокопроизводительных вычислений, что позволило бы распределять вычислительные нагрузки в периоды пиковой активности или в случае иной необходимости.

2. Требуется реализовать инструмент анализа зависимостей в вычислительных задачах для выявления оптимального порядка их выполнения (усовершенствовать планирование) с целью улучшения производительности проводимых вычислений.

3. Необходимо обязательное внедрение шифрования для обеспечения безопасности передачи данных, сохранения конфиденциальности данных волонтеров и потребителей мощностей, а также аутентификации устройств.

4. Необходимо разработать инструмент для автоматического учета и обнаружения свободных и занятых вычислительных мощностей. Система должна иметь возможность сканировать доступные вычислительные устройства на предмет определения свободных вычислительных мощностей и обновления списка устройств. А устройства в свою очередь должны регулярно передавать в системы данные о своем состоянии: готовности принять задачу, начать вычисления, передать результаты и т.д. Кроме того, нужен механизм поэтапного резервирования, архивации и передачи результатов расчетов, позволяющий не терять данные при отключении устройств от сети.

5. Должна быть проработана система стимулов для волонтеров устройств (от материальных вознаграждений до возможного участия в различных, в том числе и сторонних акциях, проектах, возможности реализации бонусов за участие на сторонних платформах и т.д.), целью которой должно быть повышения интереса к добровольному участию в проектах. В том числе каждый пользователь должен иметь некоторый доступ к вычислительной мощности системы и иметь возможность использовать ее мощности в своих нуждах. Кроме того, наличие обратной связи для волонтеров (степень вовлечения, принесенная польза, полученные результаты) может использоваться в качестве дополнительной мотивации. Полезной была бы возможность систематического сбора такой статистики и организации доступа к соответствующим данным.

6. Система должна быть максимально энергоэффективной, масштабируемой, стандарты обмена данными должны быть совместимы с современными протоколами, должно быть реализовано тестирование и валидация работы системы с обеспечением моделирования различных сценариев использования и т.д.

С точки зрения пользователя такая ситема должна предоставлять некоторый объем доступных вычислительных ресурсов для использования теми, кто в них нуждается. Существует две категории участников, взаимодействующих с системой, без которых функционирование системы не возможно - предоставляющие и потребляющие (использующие) вычислительные ресурсы.

Предоставление ресурсов может быть как безвозмездное, когда у пользователей есть лишние ресурсы и они не против поделиться ими, так и на возмездной основе [34]. Самым очевидным примером предоставления ресурсов за вознаграждение являются облачные сервисы. Это означает, что облачные сервисы вполне могут воспользоваться такой системой для пассивного поиска клиентов и заработка. Желание безвозмездно предоставлять свои вычислительные ресурсы в большинстве случаев требует создания для пользователей дополнительной мотивации, но может быть продиктовано и рядом личных соображений. Например, подключение вычислительных устройств к системе позволяет конкурировать с облачными информационными гигантами. Вследствие глобальной популярности таких систем, как *Google Cloud, Amazon Web Services, Azure* и других, пользователи часто обращаются именно к этим сервисам и зачастую не осведомлены о существовании менее известных аналогов, например *GoGrid* [58]. Отсутствие баз данных, содержащих информацию об облачных системах, также способствует данной ситуации. Интеграция малоизвестных сервисов в систему на безвозмездной основе может помочь им привлечь новых клиентов

и конкурировать на равных с более крупными сервисами. Кроме того, добровольное предоставление вычислительных мощностей может быть интересно организаторам научных исследований, после завершения работы которых может оставаться большое количество невостребованной вычислительной техники. Один из способов реализовать простаивающие вычислительные мощности – продать их какому-либо дата-центру, чтобы они затем использовалась для облачных сервисов, либо же организовать свой собственный дата-центр. Наличие же такой системы позволит предоставить эти вычислительными ресурсы для других научных и иных разработок.

Второй группе пользователей системы, которые хотят использовать вычислительные ресурсы, зачастую не важно, где происходят вычисления: в облаке, на персональном компьютере или с использованием вычислительного кластера. Главное – за разумное время получить результат с учетом некоторых корректировок и при этом потратить как можно меньше своих ресурсов.

Основными областями применения таких систем могут быть научные исследования и цифровые предприятия. Научные исследования зачастую связаны со сбором и анализом данных, и чем сложнее задача и, соответственно, больше объем данных, тем более мощные требуются вычислительные устройства. Хорошим примером таких исследований являются астрономические исследования. Они не регулярны, зависят от доступности телескопов и положения звезд на небе, но при этом связаны с обработкой больших объемов данных. Большую часть времени ученые анализируют уже имеющиеся обработанные данные, что требует один объем мощностей. Но в те моменты, когда освобождается телескоп и им получается собрать сырые данные, требуется гораздо больший объем мощностей. В такие моменты можно отдать вычисления на аутсорсинг, а не приобретать новые вычислительные устройства.

Важным моментом в научных исследованиях является взаимодействие между исследовательскими группами, что может приводить к увеличению задержек при обработке данных, так как разные группы работают с разными задачами, а для конечного результата необходима консолидация результатов работы всех групп. В астрономии можно привести пример известного проекта *Event Horizon Telescope* [59]. Он представляет собой большой массив разрозненных телескопов, расположенных в разных точках Земли, данные с которых объединяют для получения максимально информативной картины.

Цифровое предприятие – это предприятие, которое эффективно функционирует в реалиях цифрового мира за счет использования информационных технологий [59-62] для получения добавленной стоимости, оптимизации бизнес-процессов, создания новых товаров и услуг, поддержания собственной конкурентоспособности. Таким предприятиям следует постоянно подстраиваться под изменяющиеся условия цифрового мира и перестраивать цепочки внутреннего и внешнего взаимодействия. Так целое предприятие может состоять из дочерних компаний, каждая из которых выполняет определенную функцию. При этом взаимодействие между такими компаниями будет происходить в электронном виде.

Наличие инфраструктуры, которая предоставляла бы возможность задействовать свободные вычислительные мощьности подключенных к сети Интернет вычислительных устройств и отдавать на аутсорсинг обработку данных, позволило бы упростить работу, выполняемую как исследовательскими группами, так и электронными предприятиями.

На основании всего вышесказанного можно сделать вывод, что при условии внесения определенного набора изменений и доработок, связанных с использованием краудсорсинга, системы предоставления добровольных вычислительных мощностей различных устройств, доступных через интернет, могут представлять большой интерес и свободно конкурировать с облачными сервисами и датацентрами.

**Выводы.** Проанализировав текущее состояние вычислительных устройств, их типы, количество и мощности, можно с уверенностью сказать, что существует большое количество устройств, работающих на различных архитектурах и программном обеспечение – конечные устройства, персональные компьютеры, суперкомпьютеры, облачные сервисы, дата центры. Результаты анализа доступных мощностей показали, что большинство вычислительных устройств не полностью используют свои вычислительные ресурсы. В основном это конечные устройства и персональные компьютеры. Точно определить, сколько из этих ресурсов не занято расчётами, невозможно. Но даже небольшая часть доступных вычислительных мощностей в совокупности представляет значительный вычислительный ресурс.

Также был проведен анализ технических характеристик и функциональных возможностей вычислительных устройств. С технической стороны анализ включал такие параметры, как производительность, доступность, модель обслуживания. Из функциональных возможностей – типы баз данных и хранилищ данных, пакеты прикладных программ, безопасность. По результатам анализа можно выделить тот факт, что на данный момент только облачные сервисы обеспечивают высокое качество обслуживания и могут предоставить полноценно все функциональные возможности в таких наукоемких и ресурсоемких областях, как научные исследования и цифровые предприятия. Именно в этих областях присутствует довольно большое количество потребителей, у которых требования к вычислительным ресурсам зачастую выходят за рамки их локальных вычислительных ресурсов по финансовым или другим причинам. Для решения

таких задач целесообразно использовать системы добровольных вычислений, таких как *BOINC*. Но у таких систем существует ряд ограничений в виде отсутствия полноценной интеграции с популярными облачными сервисами, невозможность создания новых независимых от проекта задач и трудности с процессом организации вычислений.

Возможным решением могла бы стать глобально распределенная инфраструктура, способная автоматизировать поиск, выбор и взаимодействие конечный устройств пользователей, обеспечив тем самым эффективность добровольных вычислений. Для создания такой инфраструктуры необходимо исследовать возможные варианты привлечения конечных устройств к добровольным вычислениям и варианты взаимодействия конечных устройств в рамках ресурсоемких вычислительных проектов.

Один из возможных принципов создания такой инфраструктуры – краудсорсинг на основе принципа саморегистрации конечных устройств и лизинговой политики их использования. Такая инфраструктура позволит подбирать и объединять вычислительные ресурсы для решения ресурсоемких задач и предоставить их потребителям. Под лизинговой политикой в данном контексте понимается модель временного предоставления вычислительных ресурсов в аренду на гибких условиях, определяющих сроки использования, объём ресурсов и стоимость аренды. С одной стороны, это позволит потребителям эффективно использовать дополнительные вычислительные мощности без необходимости значительных капиталовложений в собственную инфраструктуру или долгосрочную аренду у крупных провайдеров. С другой стороны, позволит пользователям задействовать весь вычислительный потенциал устройств. Также такая инфраструктура позволит владельцам зарегистрированных устройств не тратить средства на рекламирование своих функциональных и технических возможностей за счет автоматической каталогизации, что отсутствует в системах добровольных вычислений.

Обобщая результаты проведенных исследований, можно сделать вывод о целесообразности и перспективности создания глобальной краудсорсинговой инфраструктуры для привлечения конечных вычислительных устройств пользователей к участию в наукоемких вычислительных проектах.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Reinsel D., Gantz J., Rydning J. Data age 2025: The evolution of data to life-critical. Don't focus on big data; focus on the data that's big. An IDC white paper, sponsored by Seagate. [Электронный ресурс]: https://www.seagate.com/files/www-content/our-story/trends/files/Seagate-WP-DataAge2025-March-2017.pdf.

2. Евреинов Э.В. Однородные вычислительные системы, структуры и среды. – М.: Радио и связь, 1981. – 208 с.

3. Anderson, D.P., Cobb, J., Korpela, E., Lebofsky, M., & Werthimer, D. SETI@home: An Experiment in Public-Resource Computing. Communications of the ACM. – 2002. – 45(11). – 56-61. DOI: 10.1145/581571.581573.

4. Anderson, D.P. BOINC: A System for Public-Resource Computing and Storage. – 2004. DOI: 10.1109/GRID.2004.14.

5. Anderson, D.P. BOINC: A Platform for Volunteer Computing. – 2020. DOI: 10.1007/s10723-019-09497-9.

6. Kellmereit D., Obodoevski D. The Silent Intelligence: The Internet of Things. DND Ventures LLC, 2013. – 166 p.

7. Гольдштейн Б.С., Кучерявый А.Е. Сети связи пост-NGN. СПб.: БХВ-Петербург. 2014. – 160 с.

8. Tatarnikova T.M., Elizarov M.A. Model of Estimating Temporal Characteristics of IoT Network Interaction. Information and Control Systems. – 2017. – № 2 (87). – P. 44-50. DOI: 10.15217/issn1684-8853.2017.2.44.

9. Tran T.X., Hajisami A., Pandey P., Pompili D. Collaborative mobile edge computing in 5G networks: New paradigms, scenarios, and challenges. IEEE Communications Magazine. – 2017. – № 4(55). – P. 54-61. DOI: 10.1109/MCOM.2017.1600863.

10. Dias De Assunç M., Assunção A., Da A., Veith S., Buyya R. Distributed data stream processing and edge computing: A survey on resource elasticity and future directions. Journal of Network and Computer Applications. – 2018. DOI: 10.1016/j.jnca.2017.12.001.

11. Pahl C., Helmer S., Miori L., Sanin J., Lee B. A container-based edge cloud PaaS architecture based on raspberry Pi clusters. Proc. of the 4th IEEE International Conference on Future Internet of Things and Cloud Workshops (FiCloudW). – 2016. – P. 117-124. DOI: 10.1109/W-FiCloud.2016.36.

12. Демичев А.П., Ильин В.А., Крюков А.П. Введение в грид-технологии. Препринт НИИЯФ МГУ-2007-11/832.

13. Khoruzhnikov S.E, Shevel A.Ye. Management system for scalable geographically distributed data center. Scientific and Technical Journal of Information Technologies. – 2019. – V. 19. – № 5. – P. 931-938. DOI: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-931-938.

14. Sadiku M.N.O., Musa S.M., Momoh O.D. Cloud computing: Opportunities and Challenges. IEEE Potentials. – 2014. – V. 33. – N 1. – P. 34-36. DOI: 10.1109/MPOT.2013.2279684.

15. Cisco Annual Internet Report (2018-2023). [Электронный ресурс]: https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html.

16. Mohammadi, M., Bazhirov, T. Comparative benchmarking of cloud computing vendors with high performance linpack. Proceedings of the 2nd International Conference on High Performance Compilation, Computing and Communications. – 2018. DOI: 10.1145/3195612.3195613.

17. Schmidt R., Beaty D., Dietrich J. Increasing energy efficiency in data centers. ASHRAE Journal. – 2007. – V. 49. – N. 12. – P. 18-21+24.

18. Koomey J.G. Estimating Total Power Consumption by Servers in the US and the World. – 2007.

19. Mozokhin A.E., Shvedenko V.N. Digitization development directions of national and foreign energy systems. Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. – 2019. – V. 19. – № 4. – P. 657-672. DOI: 10.17586/2226-1494-2019-19-4-657-672.

20. Реестр провайдеров дата-центров. [Электронный ресурс]: https://discover.cloudscene.com/.

21. Laplante P.A., Zhang J., Voas J. What's in a name? Distinguishing between SaaS and SOA. IT Professional. – 2008. – V. 10. – № 3. – P. 46-50. DOI: 10.1109/MITP.2008.60.

22. Gagnon S., Nabelsi V., Passerini K., Cakici K. The next web apps architecture: challenges for SaaS vendors. IT Professional. – 2011. – V. 13. – № 5. – P. 44-50. DOI: 10.1109/MITP.2011.90.

23. Cloudflare. How are serverless computing and platform-as-a-service different? – paas vs. serverless. [Электронный ресурс]: https://www.cloudflare.com/learning/serverless/glossary/serverless-vs-paas.

24. Gupta I., Gupta S., Choudhary A., Jana P.K. A hybrid meta-heuristic approach for load balanced workflow scheduling in IaaS cloud. Distributed Computing and Internet Technology. – 2019. – P. 73-89. DOI: 10.1007/978-3-030-05366-6_6.

25. Djemame K., Kavanagh R., Armstrong D., Lordan F., Ejarque J., Macias M., Sirvent R., Guitart J., Badia R.M. Energy efficiency support through intra-layer cloud stack adaptation. Economics of Grids, Clouds, Systems, and Services. – 2017. – P. 129-143. DOI: 10.1007/978-3-319-61920-0_10.

26. Shye A., Scholbrock B., Memik G. Into the Wild: Studying Real User Activity Patterns to Guide Power Optimizations for Mobile Architectures, 2009. – P.168-178, DOI

10.1145/1669112.1669135
27. Prieto B., Escobar J.J., Gómez-López J.C., Díaz A.F., Lampert T. Energy Efficiency of Personal Computers: A Comparative Analysis, 2022, MDPI, vol. 14(19). – P. 1-23. October. DOI 10.3390/su141912829
28. Venkatachalam V., Franz M. Power reduction techniques for microprocessor systems. 2005, ACM Computing Surveys (CSUR), Volume 37, Issue 3. – Pages 195-237. DOI 10.1145/1108956.1108957
29. Ghatikar R., Piette M. A., Fujita S.K., Mckane A., Han J., Radspieler A., Mares K.C., Shroyer D. Demand Response and Open Automated Demand Response Opportunities for Data Centers, 94 pages. – 2010. DOI: 10.2172/981725
30. Mallela R., Suresh K., Ramana K., Subba Rao M. Reducing Power Consumption at Computer Architectures to Improve the Performance, 2016, International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 7, Issue 3. – P. 235-241. ISSN: 2229-5518. DOI: n/d, Website: http://www.ijser.org.
31. Andriulo F.C., Fiore M., Mongiello M., Traversa E., Zizzo V. Edge Computing and Cloud Computing for Internet of Things: A Review, 2024, MDPI, Informatics 2024, 11, 71. DOI 10.3390/informatics11040071.
32. Buryy A.S., Morin E.V. Software assessment by a set of indicators. – 2019. DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-10-907-913.
33. Aljoumah E., Al-Mousawi F., Ahmad I., Al-Shammri M., Al-Jady Z. SLA in Cloud Computing Architectures: A Comprehensive Study. International Journal of Grid Distribution Computing. – 2015. – № 5(8). – P. 7-32. DOI: 10.14257/ijgdc.2015.8.5.02.
34. Ibrahim S., He B., Jin H. Towards pay-as-you-consume cloud computing. 2011 IEEE International Conference on Services Computing. – 2011. – P. 370-377. – DOI: 10.1109/scc.2011.38.
35. Колбанев М.О. Татарникова Т.М. Физические ресурсы информационных процессов и технологий. Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2014. – № 6 (94).
36. Jaeger P.T., Lin J., Grimes J.M., Simmons S.N. Where is the cloud? Geography, economics, environment, and jurisdiction in cloud computing. First Monday. – 2009. – V. 14. – № 5. DOI: 10.5210/fm.v14i5.2456.
37. A. Fox and E. A. Brewer. Harvest, yield, and scalable tolerant systems. Proceedings of the Seventh Workshop on Hot Topics in Operating Systems. – 1999. – P. 174-178. DOI: 10.1109/HOTOS.1999.798396.
38. Tatarnikova T.M., Poymanova E.D. Model of multi-level data storage system. Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. – 2019. – V. 19. – № 2. – P. 271-279. DOI: 10.17586/2226-1494-2019-19-2-271-279.
39. Богатырев В.А., Богатырев С.В. Объединение резервированных серверов в кластеры высоконадежной компьютерной системы. Информационные технологии. – 2009. – № 6. – С. 41-47.
40. Проскуряков Н.Е., Ануфриева А.Ю. Анализ и перспективы современных систем хранения цифровых данных. Известия ТулГУ: Технические науки. – 2013. – № 3. – С. 368-377.
41. Бурмистров В.Д., Заковряшин Е.М. Создание хранилища данных для распределенной системы. Молодой ученый. – 2016. – № 12. – С. 143-147.
42. Bogatyrev V.A., Parshutina S.A., Poptcova N.A., Bogatyrev A.V. Efficiency of redundant service with destruction of expired and irrelevant request copies in real-time clusters. Communications in Computer and Information Science. – 2016. – P. 337-348. DOI: 10.1007/978-3-319-51917-3_30.
43. Junqueira F., Miyagi P.E., Furlan De Oliveira V., Amorim De Oliveira Pessoa M. SQL and NoSQL Databases in the Context of Industry 4.0. Machines. – 2021. DOI: 10.3390/machines10010020.
44. Shinkaruk D.N. Runtime balancing effect in distributed simulation model. Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. – 2015. – V. 15. – № 1. – P. 101-106. DOI: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-101-106.
45. Parshutina S.A. Organization of simulation experiments in the design of distributed computer systems with redundant data transmission. Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. – 2017. – V. 17. – № 5. – P. 841-849. DOI: 10.17586/2226-1494-2017-17-5-841-849.
46. Kavchuk D.A., Matveev Y.N. Automatic security analysis of information systems independently of formal specifications. Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. – 2017. – V. 17. – № 3. – P. 431-438. DOI: 10.17586/2226-1494-2017-17-3-431-438.
47. Kaufman L.M. Data security in the world of cloud computing. IEEE Security and Privacy. – 2009. – V. 7. – № 4. – P. 61-64. DOI: 10.1109/MSP.2009.87.
48. Rossi F.D., Calheiros R.N., De Rose C.A.F. A terminology to classify artefacts for cloud infrastructure. Research Advances in Cloud Computing. – 2017. – P. 75-91. DOI: 10.1007/978-981-10-5026-84.
49. Parshotam K. Crowd Computing. Proceedings of the South African Institute for Computer Scientists and Information Technologists Conference. DOI: 10.1145/2513456.2513470.
50. Li Z., Liu J., Hao J., Wang H., Xian M. CrowdSFL: A secure crowd computing framework based on blockchain and federated learning. Electronics. – 2020. – № 5(9). DOI: 10.3390/electronics9050773.
51. Howe, J. The Rise of Crowdsourcing. Wired. – 2006. – V. 14.
52. Yuan D., Li Q., Li G., Wang Q., Ren K. PriRadar: A privacy-preserving framework for spatial crowdsourcing. IEEE Transactions on Information Forensics and Security. – 2019. – V. 15. – P. 299-314. DOI: 10.1109/TIFS.2019.2913232.
53. Balicki J., Brudlo P., Szpryngier P. Crowdsourcing and volunteer computing as distributed approach for problem solving. In Proceedings of the 13th International Conference on Software Engineering, Parallel and Distributed Systems. – 2014. – P. 115-121.
54. Murray D.G., Yoneki E., Crowcroft J., Hand S. The case for crowd computing. Proceedings of the second ACM SIGCOMM workshop on Networking, systems, and applications on mobile handhelds. – 2010. – P. 39-44. DOI: 10.1145/1851322.1851334.
55. Peng D., Wu F., Chen G. Pay as how well you do. Proceedings of the 16th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. – 2015. – P. 177-186. DOI: 10.1145/2746285.2746306.
56. Li M., Weng J., Yang A., Lu W., Zhang Y., Deng R.H. Crowdbc: A blockchain-based decentralized framework for crowdsourcing. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems. – 2018. – V. 30. – P. 1251-1266. DOI: 10.1109/TPDS.2018.2881735.
57. Yang D., Xue G., Fang X., Tang J. Crowdsourcing to smartphone. Proceedings of the 18th annual international conference on Mobile computing and networking. – 2012. – P. 173-184. DOI: 10.1145/2348543.2348567.
58. https://web.archive.org/web/20080827061812/http://www.gogrid.com/.
59. Астрономический краудсорсинг проект. [Электронный ресурс]: https://eventhorizontelescope.org.
60. Donetskaya Ju.V. The method of forming and using a digital passport for an electronic product at enterprises of the instrument-making industry. Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. – 2021. – V. 21. – № 6. – P. 969-976. DOI: 10.17586/2226-1494-2021-21-6-969-976.
61. Gurjanov A.V., Shukalov A.V., Zakoldaev D.A., Zharinov I.O., Nechaev V.A. Electronic document flow between project, production and operating enterprises in the context of Industry 4.0 digital economy. Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. – 2018. – V. 18. – № 1. – P. 106-112. DOI: 10.17586/2226-1494-2018-18-1-106-112.
62. Сысолетин Е.Г., Аксенов К.А., Круглов А.В. Интеграция гетерогенных информационных систем современного промышленного предприятия. Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1. – С. 335.

*Статья поступила в редакцию 03.11.2024*
*Статья принята к публикации 13.12.2024*

УДК 004.032.2
EDN: LTUYBN

# ДВУМЕРНЫЙ НЕЧЕТКИЙ МЕТОД КЛАСТЕРИЗАЦИИ *C*-СРЕДНИХ ДЛЯ СЕГМЕНТАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

© Автор(ы) 2024

SPIN: 2852-2633
AuthorID: 185018
ORCID: 0000-0003-3313-2731
**ГРОМОВ Юрий Юрьевич**, доктор технических наук, профессор,
директор института автоматики и информационных технологий
*Тамбовский государственный технический университет*
*(392024, Россия, Тамбов, улица Советская, 116, e-mail: gromovtambov@yandex.ru)*
SPIN: 5033-6943
AuthorID: 865469
ORCID: 0009-0009-3628-6980
**КАРАСЕВ Павел Игоревич,** кандидат технических наук, доцент кафедры КБ-1 «Защита информации»
*МИРЭА - Российский технологический университет*
*(107076, Россия, Москва, улица Стромынка, 20, e-mail: karasev@mirea.ru)*
**ШАМСУЛДИН Хайдар Абдулваххаб Х.**, аспирант
*Тамбовский государственный технический университет*
*(392024, Россия, Тамбов, улица Советская, 116, e-mail:* shamsuldaeenhaidar@mail.ru*)*
**МУСТАФА Абдулкадим Аль-Амиди Дхаир,** аспирант
*Тамбовский государственный технический университет*
*(392024, Россия, Тамбов, улица Советская, 116, e-mail:* ameedeemustafa@mail.ru*)*

**Аннотация.** Для решения проблемы низкой помехоустойчивости традиционного метода нечетких *C*-средних (*FCM*) при сегментации изображений был предложен двумерный метод кластеризации *FCM* для сегментации изображений. В этом методе сегментация изображения была преобразована в задачу оптимизации. Функция приспособленности, содержащая информацию о соседях, была настроена на основе информации об изображении, приведенном к оттенкам серого цвета, и взаимосвязей между пикселями соседей, описанными улучшенной двумерной гистограммой, используя глобальную поисковую способность метода оптимизации роя частиц в системе хищник-жертва, можно было бы получить оптимальный центр кластера путем итерационной оптимизации и выполнить сегментацию изображения. Результаты моделирования показывают, что коэффициент точности сегментации предложенного метода превышает 99%. Предложенный метод обладает сильной антишумовой способностью, высокой точностью кластеризации и хорошим сегментным эффектом, что указывает на то, что он является эффективным методом сегментации изображений.

**Ключевые слова:** сегментация изображений, нечеткая кластеризация С-средних, метод оптимизации роя частиц, двумерная гистограмма.

# A NEW TWO-DIMENSIONAL FUZZY *C*-MEANS CLUSTERING METHOD FOR IMAGE SEGMENTATION

© The Author(s) 2024

**GROMOV Yuri Yurievich**, doctor of technical sciences,
director of the Institute of Automation and Information Security
*Tambov State Technical University*
*(392024, Russia, Tambov, Sovetskaya Street, 116, e-mail: gromovtambov@yandex.ru)*
**KARASEV Pavel Igorevich,** candidate of technical sciences, associate professor,
lecturer of the KB-1 "Information Protection" Department
*MIREA - Russian Technological University*
*(107076, Russia, Moscow, Stromynka Street, 20, e-mail: karasev@mirea.ru)*
**SHAMSULDAEEN Haidar Abdulwahhab H.**, graduate student
*Tambov State Technical University*
*(392024, Russia, Tambov, Sovetskaya Street, 116, e-mail: shamsuldaeenhaidar@mail.ru)*
**MUSTAFA Abdulkadhim Al-Ameedee Dhahir**, graduate student
*Tambov State Technical University*
*(392024, Russia, Tambov, Sovetskaya Street, 116, e-mail: ameedeemustafa@mail.ru)*

**Abstract.** To address the issue of low noise immunity in the traditional fuzzy *C*-means (*FCM*) method for image segmentation, a novel two-dimensional *FCM* clustering approach has been introduced. This method redefines image segmentation as an optimization problem. The fitness function, which incorporates information about neighboring pixels, is constructed based on a grayscale version of the image and an enhanced two-dimensional histogram that

captures the relationships between neighboring pixels. By utilizing the global search capabilities of the particle swarm optimization method within a predator-prey system framework, the optimal cluster center can be found through iterative optimization, enabling effective image segmentation. Simulation results demonstrate that the segmentation accuracy of this new approach exceeds 99%. The method exhibits robust noise resistance, high clustering precision, and excellent segmentation performance, making it a highly effective solution for image segmentation.

**Keywords:** image segmentation, fuzzy clustering of *C*-means, particle swarm optimization method, two-dimensional histogram.

*Для цитирования: Громов Ю.Ю. Двумерный нечеткий метод кластеризации С-средних для сегментации изображений / Ю.Ю. Громов, П.И. Карасев, Х.А.Х. Шамсулдин, А.А.-А.Д. Мустафа // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 4(68). – С. 111-117. – EDN: LTUYBN.*

**Введение.** Из-за игнорирования информации о пространственных ограничениях метод нечетких *C*-средних (*FCM*) не смог сегментировать изображения, поврежденные шумом [1-2]. Для повышения устойчивости *FCM* к шуму были предложены некоторые методы, использующие информацию о пространственных соседях в изображении [3]. В настоящее время к относительно успешным методам относятся: Метод, использующий границу соседства в качестве целевой функции для изменения целевой функции кластеризации[4-5]; новый метод измерения расстояния вместо евклидова расстояния в качестве стандарта другой меры[6]; теория веса для коррекции функции принадлежности пикселей была применена [7]; метод сегментации изображений с использованием нечеткой кластеризации *C*-средних (*FCM*) с пространственными ограничениями на основе случайного поля Маркова (*MRF*) с помощью байесовской теории [8]. Благодаря преимуществам отображения информации изображении, преобразованного в изображение в оттенках серого цвета, и информации о пространственных соседях изображения, эти методы значительно улучшают эффект сегментации зашумленного изображения по сравнению с традиционным *FCM*. Но проблемы все еще существуют: легко попасть в локальный минимум, сходимость медленная, а эффект подавления шума не так хорош для центра кластера, когда используется итерационная оптимизация методом *FCM*.

В этой работе был предложен метод сегментации изображения, использующий информацию изображения, преобразованного в изображение в оттенках серого цвета, и информацию о пространственных соседях изображения. Во-первых, была построена улучшенная двумерная гистограмма изображения, преобразованного в изображение в оттенках серого цвета. Во-вторых, центр нечеткого кластера был получен с помощью метода оптимизации роя частиц в системе хищник-жертва (*PPPSO*), и была вычислена функция принадлежности для каждого пикселя к центру кластера, затем нечеткий кластер для каждого пикселя двумерной гистограммы был обработан с использованием метода кластеризации нечетких *C*-средних. Наконец, согласно функции принадлежности, классификация пикселей была завершена, и сегментация изображений стала реальной. Поскольку информация изображения, преобразованного в изображение в оттенках серого цвета, и информация о пространственных соседях каждого пикселя были приняты во внимание, проблема, заключающаяся в том, что объект и фон на одномерной гистограмме не различались, легко решалась. Благодаря возможности глобального поиска методом оптимизации роя частиц в системе хищник-жертва (*PPPSO*), оптимальный центр кластеризации может быть получен путем оптимизации.

**Методология.** При применении метода кластеризации нечетких *C*-средних при сегментации изображений пиксели изображения обрабатываются как набор $S$ ($S=s_k$, $k=1, 2, \cdots, n$) из n таблиц стилей, которые делятся на кластеры $C$ ($2 \le C \le n$), чтобы разделение изображений осуществлялось в соответствии с измерением взвешенной сопоставимости между изображением и центром кластеризации. Теперь предполагается, что вектор $m_i$ ($i=1, 2, \cdots, C$) – центр кластера, а $\mu_{ik}$ – функция принадлежности $k$-ой таблицы стилей к $i$-му классу.

Они удовлетворяют условию $0 \le \mu_{ik} \le 1$ и $\sum_{i=1}^{C} \mu_{ik} = 1$, тогда целевая функция кластеризации, определяемая функцией принадлежности, выглядит следующим образом.

$$J(U, M) = \sum_{i=1}^{C} \sum_{k=1}^{n} \left[\mu_{ik}\right]^b d_{ik}^2 \quad (1)$$

где $U=[\mu_{ik}]$ – нечеткая матрица классификации; $M=\{m_1, m_2, \cdots, m_c\}$ – множество центров кластеров $C$; $b=[1, \infty]$ – взвешенный индекс, чем больше $b$, тем нечетче деление, и в этой работе $b$ равно 2; параметр $d_{ik}$ означает евклидово расстояние от $k$-ой таблицы стилей до $i$-го центра кластера.

Сегментация изображения с нечеткой кластеризацией заключается в подтверждении функции принадлежности $\mu_{ik}$ и центра кластера $m_i$ итерационно в соответствии с правилом кластеризации минимизации целевой функции $J(U, M)$. С помощью множителя Лагранжа расчетные формулы для $\mu_{ik}$ и $m_i$ могут быть представлены в виде формул (2) и (3). Если набор данных $S$, номер класса кластеризации $C$ и взвешенный индекс $b$ известны, то функция принадлежности и центр кластера могут быть определены уравнениями (2) и (3) в процессе итерации [9-10].

$$\mu_{ik} = \left[ \sum_{j=1}^{C} \left( d_{ik} / d_{jk} \right)^{2/(b-1)} \right]^{-1} \quad (2)$$

$$m_i = \frac{\sum_{k=1}^{n} [\mu_{ik}]^b s_k}{\sum_{k=1}^{n} [\mu_{ik}]^b d_{ik}^2} \quad (3)$$

На каждой итерации *PSO* скорость и положение частицы обновляются путем динамического отслеживания параметров $p_i$ и $p_g$:

$$v_{ij}(t+1) = \omega v_{ij}(t) + c_1 r_{1j}(t)\,[p_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + c_2 r_{2j}(t)[p_{gj}(t) - x_{ij}(t)] \quad (4)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (5)$$

где $i$ представляет $i$-ю частицу; $j$ представляет $j$-ю размерность частицы; $t$ представляет $t$-ю итерацию; $\omega$ – коэффициент инерции; $c_1$ и $c_2$ – факторы обучения, и они обычно оцениваются в пределах 0-2; $r_1$ и $r_2$ – независимые случайные числа, оцениваемые в диапазоне от 0 до 1.

*Метод оптимизации роя частиц в системе хищник-жертва.* Следуя методу *PSO* легко попасть в локальный оптимум. Внесение изменений в общий поток движения частиц появлением хищника, для которого частицы являются жертвой и которые избегают его, привело к созданию метода оптимизации роя частиц в системе хищник-жертва (*PPPSO*), предложившего путем включения модели поведения хищник-жертва в метод оптимизации роя частиц сохранить разнообразие движения роя и тем самым избежать досрочной сходимости всех движений в районе локального оптимума[10]. В этом методе частицы делятся на две категории: хищник и жертва. Хищники демонстрируют поведение погони за центром роя частиц, являющихся жертвой, что выглядит как погоня за жертвой. И частицы, являющиеся жертвой, спасаются от хищников в многомерном пространстве решений. Это способствует тому, что частицы разбегаются из локальных оптимальных решений и в конце концов находят глобальное оптимальное решение. В методе *PSO* в модификации хищник-жертва скорости отслеживания хищника и жертвы выражаются следующим образом:

$$v_{y1ij}(t+1) = \omega_{y1} v_{y1ij}(t) + c_1 r_{1j}(t)\,[p_{y1ij}(t) - x_{y1ij}(t)] + c_2 r_{2j}(t)\,[p_{gj}(t) - x_{y1ij}(t)] \quad (6)$$

$$v_{y2ij}(t+1) = \omega_{y2} v_{y2ij}(t) + c_1 r_{1j}(t)\,[p_{y2ij}(t) - x_{y2ij}(t)] + c_2 r_{2j}(t)\,[p_{gj}(t) - x_{y2ij}(t)] - Pa_1 sign(x_{y2Ij}(t) - x_{y2ij}(t)) \cdot \exp\{-a_2 | x_{y1Ij}(t) - x_{y2ij}(t)|\} \quad (7)$$

где нижние индексы $y_1$ и $y_2$ означают соответственно хищника и жертву; $p_g$ – это глобальная лучшая позиция, которую разделяют хищники и жертва; нижний индекс $I$ – это номер хищника, который выбран следующим образом:

$$I = \left\{\lambda \left| \min_{\lambda} \left| x_{y_1 \lambda_j} - x_{y_2 ij} \right| \right.\right\} \quad (8)$$

То есть на каждой итерации и в каждом измерении выбирается ближайший хищник для каждой жертвы. Четвертый член в уравнении (7), $P$ – двоичная переменная, стохастически равная 0 или 1, которая определяет, убегает ли жертва или нет. Следовательно, жертвы продолжают убегать от хищников, а хищники продолжают занимать все более лучшие позиции в окрестности $p_g$ от одной итерации к следующей.

*Разработка нового двумерного метода кластеризации FCM для сегментации изображений.* Некоторые модифицированные методы были применены для эффективного ограничения распространения шума в кластере путем учета пространственной и соседней информации о пикселе, поскольку результат традиционного метода *FCM* для сегментации зашумленного изображения был хуже. Хотя информация о пространственных соседях изображения учитывалась во всех видах улучшенных методов, метод непроизвольно приводил вычислительный процесс в локальный оптимум и не мог способствовать получению оптимального или хотя бы удовлетворительного решения, поскольку центр кластера был получен благодаря итерационному поиску оптимума методом *FCM*. В предложенном методе кластеризация сегментации изображений была преобразована в задачу оптимизации. Метод оптимизации роя частиц в системе Хищник-жертва был методом глобальной оптимизации и обладал глобальной поисковой способностью для поиска оптимального центра кластера во всем пространстве решения и мог избежать преждевременной сходимости.

*Улучшенная двумерная гистограмма изображения, преобразованного в изображение в оттенках серого цвета.* В соответствии с шаблонами фильтрации пиксели вокруг пикселя могут быть окрестностью для вычисления значения оттенка серого цвета окрестности. Двумерная гистограмма изображения строится по значению оттенка серого цвета пикселя и значению оттенка серого цвета его окрестности. Значение оттенка серого цвета окрестности может быть средним значением оттенка серого цвета окрестности, а также может быть средним значением серого цвета окрестности. При сглаживании изображения фильтр среднего значения будет размывать границу, поэтому фильтрация не так хороша. Медианный фильтр может эффективно защитить информацию о границах. Фильтрация особенно хороша для шума типа соль-перец и гауссовского шума. Чтобы в полной мере использовать информацию о пространственном окружении, в этой работе был принят улучшенный метод двумерной гистограммы. Сначала примените к изображению медианный фильтр и используйте его в качестве одномерной (*1D*) информации для двумерной (*2D*) гистограммы, а затем примените второй медианный фильтр. Полученный результат может быть другим измерением. Таким образом, улучшенная двумерная гистограмма изображения, преобразованного в изображение в оттенках серого цвета, строится по медианному значению первого медианного фильтра окрестности и медианному значению второго медианного фильтра окрестности. Таким образом, он может эффективно защищать информацию о границе.

*Проектирование популяции и подтверждение функции приспособленности.* В оптимизации параметром, подлежащим оптимизации, является центр кластера изображения. Поэтому рой может быть спроектирован как группа центров кластера, которые и представляются в виде частиц. Пространство измерений частицы представляет собой координаты центра кластера, а именно. частица $x_i$ может быть представлена как $x_i = \{m_{i1}, m_{i2}, \cdots, m_{ic}\}$, где $m_i$ – центральный вектор кластеризации $i$-й частицы. Для функции приспособленности следует учитывать влияние на кластеризацию, исходящее из информации об окрестности пикселя, чтобы улучшить способность метода подавлять шум. Таким образом, функция влияния окрестностей переносится в функцию приспособленности в соответствии с улучшенной двумерной гистограммой изображения, преобразованного в изображение в оттенках серого цвета, приведенной выше. Таким образом, функция приспособленности может быть представлена в виде:

$$F(i) = \sum_{j=1}^{C}\sum_{k=1}^{n}[\mu_{jk}]^b \left\| s_{k_1Med} - m_{ij} \right\|^2 + \alpha \sum_{j=1}^{C}\sum_{k=1}^{n}[\mu_{jk}]^b \left\| s_{k_2Med} - m_{ij} \right\|^2 \quad (9)$$

где $F(i)$ означает функцию приспособленности; $s_{k_1Med}$ – представляет собой медианное значение первого медианного фильтра окрестности; $s_{k_2Med}$ – представляет собой медианное значение второго медианного фильтра окрестности.

*Разработка метода.* Когда метод достигает сходимости, частица, которая имеет минимальную приспособленность будет оптимальной частицей, а центры кластеров будут оптимальными, тогда сегментация изображения будет закончена кластеризацией сегментированного изображения, в котором центр кластера подтверждается оптимальной частицей. Конкретные шаги для достижения этого заключаются в следующем.

1) Применить второй медианный фильтр для данного изображения, подлежащего сегментации, и получить улучшенную двумерную гистограмму изображения, преобразованного в изображение в оттенках серого цвета.

2) Определить размер популяции хищников и жертв; затем установите размерность частицы равной $C$, которая является размерностью класса кластеризации, и установить начальные значения для частиц хищников и жертв, а также сделать каждое измерение частицы действительным числом от 0 до 255; установить начальную скорость и соответствующие параметры метода.

3) Подсчитать первоначальное глобальное оптимальное положение роя и индивидуальное оптимальное положение каждой частицы.

4) Вычислить расстояние от каждого пикселя и центра кластера до определенного центра кластера и функцию принадлежности для каждого пикселя центру кластера.

5) Вычислить значение приспособленности для каждой частицы. Использовать уравнение (9) в качестве функции приспособленности в методе *PSO* и вычислить значение приспособленности каждой частицы по результату шага 4).

6) Сравнить значение приспособленности каждой частицы со значением наилучшего положения ($p_i$), которое она посетила. Если оно лучше, тогда значение будет текущей лучшей позицией; такое же сравнение проводится для всего роя, чтобы получить лучшую глобальную позицию.

7) Обновить скорость хищника $v_{yli}$ и положение $x_{yli}$ используя уравнения (6) и (5).

8) Обновить скорость частицы – жертвы $v_{y2i}$ и положение $x_{y2i}$ используя уравнения (7) и (5).

9) Если условие остановки выполнено, метод завершен. Глобальное оптимальное решение $p_g$ будет оптимальным центром кластера, который в конечном итоге будет найден; или же необходимо перейти к шагу 4).

10) Выполнить сегментацию изображения по оптимальному центру кластера, полученному в результате оптимизации.

**Результаты.** Для проверки эффективности метода в данной работе были проведены сравнительные эксперименты. Сравниваемые способы включали: стандартные *FCM* и *FCM_S*, основанные на медианном значении окрестности [11-12]. Экспериментальные параметры в этой работе были следующими: размер роя частиц хищников составлял 5 , размер роя частиц жертв – 25, $c_1$ и $c_2$ были установлены в 1,49; $\omega_{max}$ в 0,9; $\omega_{min}$ в 0,2 и $p_f$ в 0,02. Моделирование метода сегментации было запрограммировано программным обеспечением *Matlab*.

Размер построенного синтетического изображения составлял 128 × 128, содержащего 2 уровня серого цвета 60 и 200. В результате при сегментации число классов было установлено равным 2. Для сравнения антишумовых характеристик 3 вышеперечисленных методов к синтетическому изображению был добавлен гауссовский шум со средним значением 0 и дисперсией 0,04. Результаты экспериментов показаны на рисунке 1. Из рисунка1 видно, что традиционный *FCM* бесполезен для шума, а сегментация далека от идеала, поскольку ее сегментация основана на текущем пикселе; *FCM_S* значительно улучшает результат защиты от шума благодаря влиянию соседей, но все еще остается некоторый шум; благодаря учету пространственной информации о соседстве, оптимальный центр кластера может быть получен путем оптимизации, визуальный эффект сегментации очень хорош по методу, предложенному в этой работе, который намного лучше, чем другие 2 метода.

*Сравнение результатов.* Точность сегментации оценивалась с помощью количества пикселей с ошибкой (*T12E*) и коэффициента точности сегментации (*SAR*). *T12E* – это количество пикселей с ошибочной классификацией, а *SAR* – отношение пикселей правильной классификации к общему количеству пикселей изображения. Сегмент изоб-

ражения без шума с использованием *FCM* или исходное изображение было эталонным объектом для оценки правильности классификации пикселя [12].

Гауссовские шумы со средним значением 0 и дисперсией 0,03 и средним значением 0 и дисперсией 0,08 были добавлены отдельно к синтетическому изображению, и полученные центры кластеров, неправильно распознанные пиксели и коэффициент точности сегментации с различными шумами были сравнены с двумя методами. Сравнение производительности кластеризации сегментации несколькими методами приведено в таблице 1.

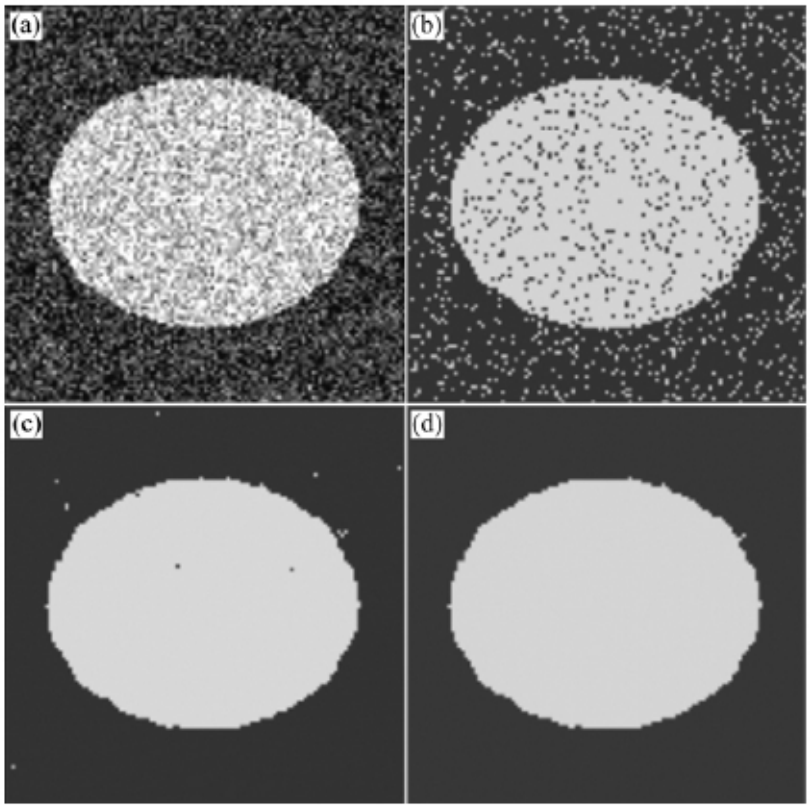



*Рисунок 1 – Экспериментальные результаты синтетического изображения с гауссовым шумом: (a) изображение искажено гауссовым шумом; (b) Результат, полученный методом FCM; (c) Результат, полученный методом FCM_S; (d) Результат, полученный предлагаемым методом*

*Таблица 1 – Сравнение производительности кластеризации сегментации несколькими методами*

| Метод | $\sigma^2$=0.03 | | | $\sigma^2$=0.08 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Центр кластера | T12E | SAR/% | Центр кластера | T12E | SAR/% |
| С средних | 49.792 7, 199.101 3 | 1972 | 91.98 | 28.576 1, 276.356 6 | 3265 | 82.11 |
| С средних_S | 49.792 7, 199.101 3 | 63 | 99.57 | 28.576 1, 276.356 6 | 356 | 98.02 |
| Предлагаемый метод | 61.201 8, 189.683 4 | 28 | 99.81 | 31.243 6, 201.741 3 | 119 | 99.31 |

Значения в таблице 1 представляют собой среднее значение 10 алгоритмических операций. Из полученного центра кластера, поскольку два метода *FCM* и *FCM_S* в функции принадлежности и центре кластера имеют одинаковую формулу расчета, может быть получен согласованный центр кластера. В то же время на них влияет шум. По мере усиления шума ошибка центра кластера становится больше. Но предложенный метод обладает сильной антишумовой способностью, хорошим центром кластера и небольшим влиянием шума. С точки зрения точности классификации, метод *FCM* дает больше пикселей неправильной классификации, а точность сегментации в случае применения метода *FCM* ниже. Когда шум становится сильным, количество пикселей неправильной классификации быстро увеличиваются, и точность сегментации, очевидно, снижается. Когда шум ниже, количество пикселей неправильной классификации при применении метода *FCM_S* невелико, а точность сегментации достаточно высока, но по мере того, как шум становится сильным, количество пикселей неправильной классификации увеличивается, а точность сегментации снижается. Предложенный метод имеет малое количество пикселей неправильной классификации, высокую точность сегмен-

тации; влияние шума на сегментацию не так велико; антишумовая способность и степень точности в кластеризации сегментации лучше, чем у 2 других методов.

**Обсуждение.** Результаты моделирования и сравнение производительности показывают, что предложенный метод лучше, чем Методы *FCM* и *FCM_S*. Причины в основном в двух аспектах. Во-первых, в предложенном методе принята улучшенная двумерная гистограмма.

Гистограмма синтетического изображения со средним значением 0 и дисперсией 0,04 показана на рисунке 2. Рисунок 2a и рисунок 2b являются одномерной и двумерной гистограммами соответственно. На рисунке 2a трудно различить объект и фон с перекрытием на одномерной гистограмме после добавления шума в синтетическое изображение, и это основная причина того, что метод *FCM* не может сегментировать изображения, поврежденные шумом. При использовании улучшенной двумерной гистограммы изображения, преобразованного в изображение в оттенках серого цвета, на этой гистограмме появляются два отчетливых пика, и легко различить объект и фон на рисунке 2б. Другая причина заключается в том, что метод использует глобальную поисковую способность метода роя частиц для поиска центра кластера во всем пространстве решений, и оптимальный центр кластера может быть получен методом роя частиц в системе хищник-жертва.

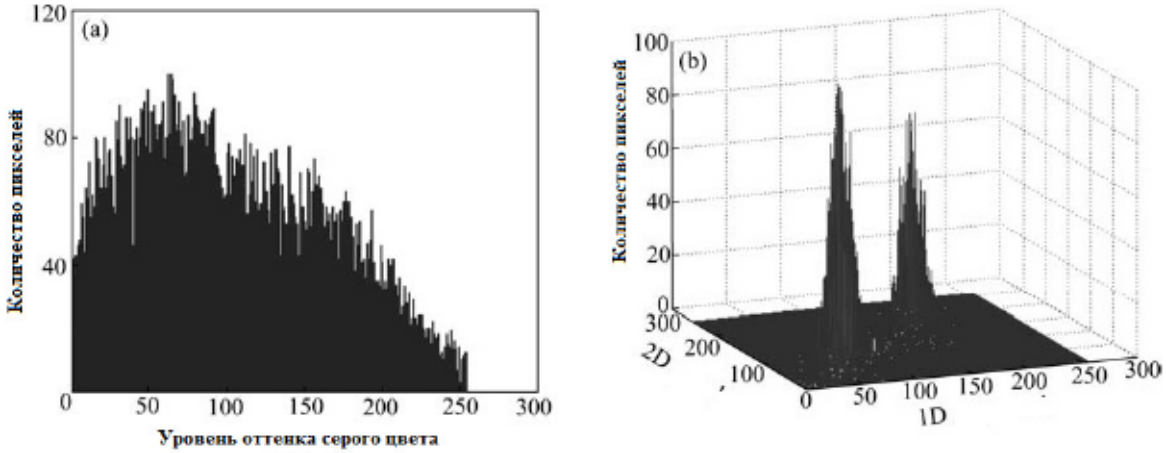



*Рисунок 2 – Гистограмма синтетического изображения:*
*(a) Одномерная гистограмма синтетического изображения;*
*(b) Улучшенная двумерная гистограмма синтетического изображения*

**Выводы.** Используя информацию изображения, преобразованного в изображение в оттенках серого цвета и отношения соседства между пикселями, строится улучшенная двумерная гистограмма. В соответствии с улучшенной двумерной гистограммой модифицируется целевая функция традиционного метода *FCM* и устанавливается функция приспособленности, включающая информацию об окрестностях пикселя изображения.

Используя глобальную поисковую способность метода оптимизации роя частиц в системе хищник-жертва (*PPPSO*), оптимальный центр кластера может быть получен путем оптимизации.

При сегментации зашумленного изображения предлагаемый метод имеет меньшее количество пикселей неправильной классификации, более высокую точность сегментации, более сильную антишумовую способность и ведет себя намного лучше, чем текущий двухмерный метод нечеткого среднего.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Сравнение нечетких методов обработки изображений / Ю.Ю. Громов, П.И. Карасев, М.Ю. Титов, Ф.А. Сари // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2021. – № 7. – С. 55-61. – DOI 10.25791/pribor.7.2021.1279. – EDN WMKTIP.

2. Неретина, В.В. Алгоритм вычисления цветовых характеристик полутонового комплексированного многоспектрального изображения на основе кластеризации изображения-эталона / В.В. Неретина, В.Н. Ефанов // Информационно-управляющие системы. – 2017. – № 6(91). – С. 15-23. – DOI 10.15217/issn1684-8853.2017.6.15. – EDN ZXWUTF.

3. Green W. Econometric analysis. Book 1 / ed. Sinelnikov S.S., Turuntseva M.Yu. Moscow: Delo, 2016. – 760 p.

4. M.A. Wagan, et al. Soil Moisture Retrieval Using Machine Learning Techniques and Sentinel-1 Data // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2020.

5. S.S. Khan, et al. Image Classification Using Fuzzy Logic and Neural Networks: A Review // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. – 2019.

6. Прохоренков, А.М. Об использовании методов нечеткой логики для определения характеристик случайных процессов / А.М. Прохоренков // Сборник материалов международной конференции "XXIX Крымская Осенняя Математическая Школа-симпозиум по спектральными эволюционным задачам" КРОМШ-2018, пос. Батилиман (Севастополь), 17-29 сентября 2018 года. – пос. Батилиман (Севастополь): ООО "Полиграфинт", 2018. – С. 111-112. – EDN YPAWFV.

7. Konovalenko, I.A. Maximal Coordinate Discrepancy as Accuracy Criterion of Image Projective Normalization for Optical Recognition of Documents / I.A. Konovalenko, V.V. Kokhan, D.P. Nikolaev // Bulletin of the South Ural State University. Series:

Mathematical Modelling, Programming and Computer Software. – 2020. – Vol. 13, No. 3. – P. 43-58. – DOI 10.14529/mmp200304. – EDN: PNBBPB.

8. Раухваргер А.Б. Обработка цифровых изображений приведением гистограммы яркости к двухуровневому кусочно равномерному распределению / А.Б. Раухваргер, Н.А. Пошехонов // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. – 2019. – Т. 6. – С. 42-45. – EDN: AVBD-VX.

9. Abbasov I.B. Image Recognition in Agriculture and Landscape Protection / I.B. Abbasov // International Journal of Science and Research. – 2020. – Vol. 9, No. 12. – P. 757-763. – DOI 10.21275/SR201212144831. – EDN: RNWECM.

10. A.K. Singh, et al. Fuzzy Logic and Its Applications in Image Classification: A Review // International Journal of Fuzzy Systems. – 2020.

11. S.S. Rao, et al. Fuzzy Logic Approach for Image Classification of Remote Sensing Data // Journal of the Indian Society of Remote Sensing. – 2019.

12. A.K. Singh, et al. Artificial Neural Networks for Image Classification: A Review // Journal of Intelligent Information Systems. – 2020.

*Статья поступила в редакцию 26.10.2024*
*Статья принята к публикации 13.12.2024*

УДК 658.15:336
EDN: PEJJMD

# ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ В СИСТЕМЕ ФИНАНСОВОГО КОНТРОЛЯ

© Автор(ы) 2024
SPIN: 7345-7540
AuthorID: 585433
ORCID: 0000-0002-2377-539X
ScopusID: 57188806820

**ПАЩЕНКО Татьяна Юрьевна,** кандидат экономических наук, доцент,
доцент кафедры «Экономика и финансы»
*Пензенский государственный университет*
*(440026, Россия, Пенза, улица Красная, 40, e-mail: tania.pashchenko@gmail.com)*

**ИЛЬИЧЕВА Ирина Юрьевна,** студентка кафедры «Экономика и финансы»
*Пензенский государственный университет*
*(440026, Россия, Пенза, улица Красная, 40, e-mail: ilichevairinaa@mail.ru)*

**САЛЬНИКОВА Полина Алексеевна,** студентка кафедры «Экономика и финансы»
*Пензенский государственный университет*
*(440026, Россия, Пенза, улица Красная, 40, e-mail: polina.77s@mail.ru)*

**Аннотация.** Статья посвящена анализу актуальных проблем, возникающих в процессе государственного финансового контроля, а также поиску путей их решения. Финансовый контроль – это совокупность действий и мероприятий по проверке финансовых и связанных с ними вопросов деятельности субъектов хозяйствования и управления с применением специфических форм и методов его организации. С понятием финансовый контроль тесно связано такое понятие, как финансовый мониторинг – комплекс мероприятий по анализу данных о финансовых операциях, а также мероприятия по проверке информации в соответствии с законодательством РФ. В тексте статьи отражено современное состояние в сфере государственного финансового контроля, представлен опыт реализации финансового контроля отдельными органами финансового контроля, выявлены проблемы. Так, реализация принципа эффективности при формировании и использовании бюджетных средств невозможна только путем осуществления внешнего контроля со стороны специально уполномоченных органов публичного финансового контроля либо внутреннего государственного финансового контроля со стороны Федерального казначейства. Для этого требуется повышение качества финансового менеджмента, выявление и управление рисками внутри самого подконтрольного объекта, что, безусловно, требует создания эффективной системы внутреннего финансового контроля в каждом органе, являющемся администратором доходов, т.е. своевременного предупреждения совершения бюджетных правонарушений, работы над совершенствованием механизма проведения бюджетных процедур и с устранением возникающих рисков.

**Ключевые слова:** финансовый контроль, финансовый мониторинг, государственный контроль, аудит, финансовый менеджмент, финансовая безопасность, эффективность, неэффективность, совершенствование системы, контрольно-счетные органы.

# PROBLEMS AND SOLUTIONS IN THE FINANTIAL CONTROL SYSTEM

© The Author(s) 2024
**PASHCHENKO Tatiana Yuryevna,** candidate of sciences in Economics, associate professor,
associate professor of the department «Economy and finance»
*Penza State University*
*(440026, Russia, Penza, Krasnaya Street, 40, e-mail: tania.pashchenko@gmail.com)*

**ILYICHEVA Irina Yuryevna,** student of the department «Economy and finance»
*Penza State University*
*(440026, Russia, Penza, Krasnaya Street, 40, e-mail: ilichevairinaa@mail.ru)*

**SALNIKOVA Polina Alekseevna,** student of the department «Economy and finance»
*Penza State University*
*(440026, Russia, Penza, Krasnaya Street, 40, e-mail: polina.77s@mail.ru)*

**Abstract.** The article is devoted to the analysis of current problems arising in the process of state financial control, as well as to finding the ways to solve them. Financial control is a set of actions and activities to check financial and related issues of the activities of business entities and management using specific forms and methods of its organization. The concept of financial control is closely related to such a concept as financial monitoring - a set of measures to analyze data on financial transactions, as well as measures to verify information in accordance with the legislation of the Russian Federation. The text of the article reflects the current situation in the field of state financial control, presents the experience of implementing financial control by individual financial control bodies, and identifies problems. Thus, the implementation of the principle of efficiency in the formation and use of budget funds is impossible only through external control by specially authorized public financial control bodies or internal state financial control by the Federal

Treasury. This requires improving the quality of financial management, identifying and managing risks within the controlled object itself, which, of course, requires the creation of an effective system of internal financial control in each body that is an administrator of revenues, i.e., timely prevention of budget violations, work to improve the mechanism for conducting budget procedures and eliminating emerging risks.

**Keywords:** financial control, financial monitoring, state control, audit, financial management, financial security, efficiency, inefficiency, system improvement, control and accounting bodies.

*Для цитирования: Пащенко Т.Ю. Проблемы и решения в системе финансового контроля / Т.Ю. Пащенко, И.Ю. Ильичева, П.А. Сальникова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 4(68). – С. 118-123. – EDN: PEJJMD.*

**Введение.** Финансовый контроль играет важную роль для обеспечения порядка и эффективности в финансовой сфере. Он способствует не только соблюдению законодательства, но и оптимизации финансовых процессов. Именно поэтому реформе государственного финансового контроля уделяется особое внимание: формированию прозрачной системы регулирования с понятными, а главное, выполнимыми для бизнеса правилами. Формирование комфортных условий для ведения бизнеса, последовательное снижение административной нагрузки при сохранении высокой эффективности государственного регулирования – это принципиальные задачи.

**Методология.** Изучению проблем в системе государственного финансового контроля и поиску путей их решения посвятили свои работы многие ученые: Андреев С.А. [1], Антропцева И.О. [2-4], Артамонова В.Н. [5], Архиреева А.С. [6], Булыга Р.П. [7], Быковская Ю.В. [8], Бычков В.В. [9], Волков А.Ю. [10], Щеглов В.Ю., Скворцов А.О. [11], Григорьев А.В., Голод К.К. [12], Климанов В.В., Казакова С.М., Михайлова А.А. [13], Литвиненко А.Н., Самойлова Л.К. [15], Симко М.М. [17], Ситник А.А. [18], Храмченко А.А., Коровин Д.А., Горбенко Е.А. [19], Хомушку В.К. [20], Царева Л.М. [21], Шмалий О.В. [22] и др. Однако по-прежнему существует ряд проблем, связанных с осуществлением государственного финансового контроля. Цель настоящей работы – анализ данных проблем и решений в системе финансового контроля.

При анализе динамики количества проверок и эффекта от контрольных операций была использована методология Минэкономразвития России [16], а при анализе объемов подозрительных операций с признаками вывода денег за рубеж и объемов обналичивания денег в банковском секторе – методология Банка России [24].

**Результаты.** В ходе проведенного анализа было выявлено, что на протяжении ряда последних лет наблюдается как значительное снижение общего количества проверок, так и структурные изменения, вызванные изменением регулирования, введением моратория на массовые проверки, а также расширением применения риск-ориентированного подхода в контроле – проверки объектов высокого и чрезвычайно высокого риска, расширением использования индикаторов риска. На рисунке 1 представлена динамика количества проверок в 2015-2023 годах.

Итоги 2023 года показывают, что общее количество контрольных мероприятий незначительно (на 4,4%) превысило показатель 2022 года. При этом около 13,8 тысяч проверок проведено в рамках «публичного» контроля.

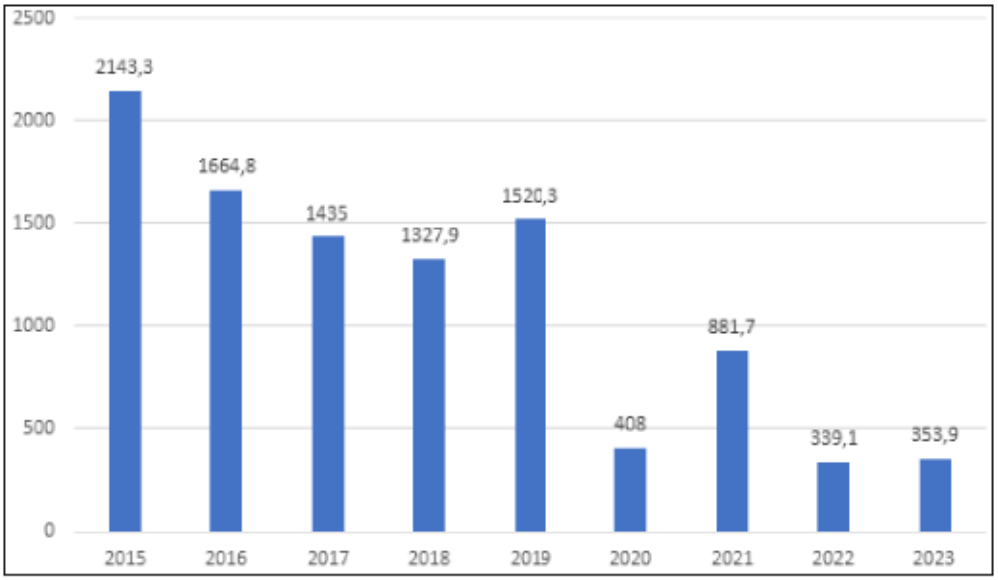



*Рисунок 1 – Динамика количества контрольных мероприятий в 2015-2023 годах, тыс. [16]*

Распределение контрольных мероприятий по уровням контрольных органов практически не меняется на протяжении ряда лет. Так, две трети всех проверок приходится на долю контрольных органов федерального уровня.

На рисунке 2 представлено распределение контрольных мероприятий по видам в 2023 году, %.

В 2023 году без учета «публичного контроля» проведено 340,1 тысяч проверок. При этом по сравнению с 2022 годом существенно изменилась структура в разрезе проводимых мероприятий. Наиболее заметно выросла доля контрольных закупок (в 12 раз), доля инспекционных визитов в структуре мероприятий увеличилась в 1,8 раза. Эти инструменты заместили часть выездных и документарных проверок, доля которых в общем объеме мероприятий снизилась. На рисунке 3 представлен эффект от контрольных мероприятий по видам в 2023 году, %.

В 2023 году нарушения выявлены в 158,8 тыс. проверок, что составляет 47% всех проверок. При этом эффект проверок существенно отличается: для плановых проверок он в среднем выше, чем по внеплановым. Максимальный эффект отмечен у проверок контрольных органов федерального уровня. Сравнительный анализ эффекта проверок с предыдущими периодами невозможен по причине неполноты отражения данных о выявленных нарушениях до 2023 года. 93,2 % контрольных закупок выявили нарушения. Наименьшая доля проверок с выявленными нарушениями отмечена для выборочного контроля – 20,7%.

Финансовый контроль осуществляет и Банк России. Он борется с подозрительными операциями в финансовой системе. По данным Банка России в результате целенаправленных действий суммы подозрительных операций в последние годы постоянно снижаются.

На рисунке 4 показана динамика сумм подозрительных операций с признаками вывода денег за рубеж.

На рисунке 5 представлены суммы обналичивания денег в банковском секторе.

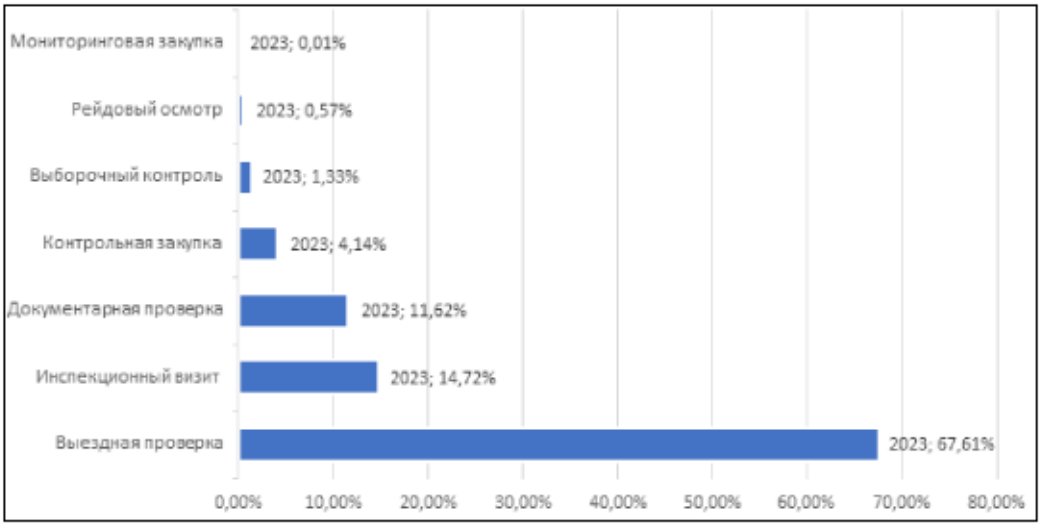



*Рисунок 2 – Распределение контрольных мероприятий в 2023 году, тыс. [16]*

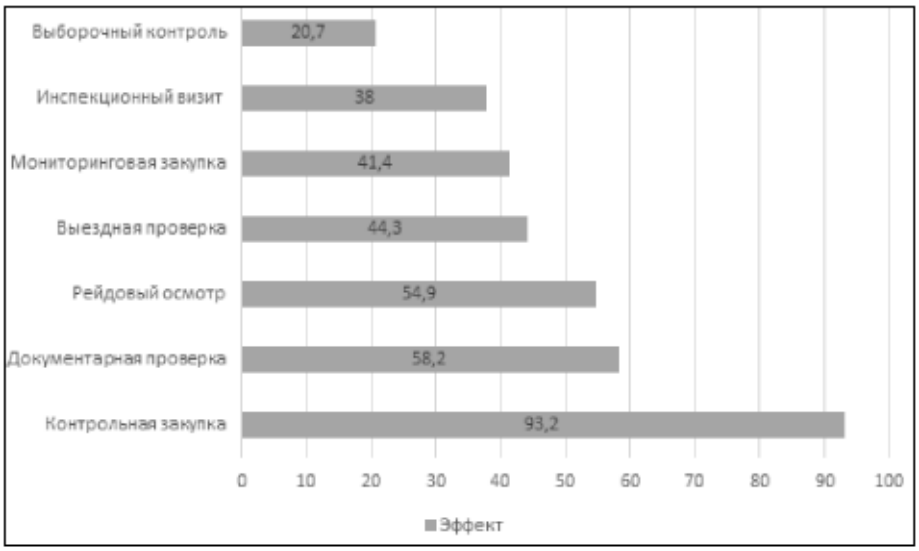



*Рисунок 3 – Эффект от контрольных мероприятий по видам в 2023 году, тыс. [16]*

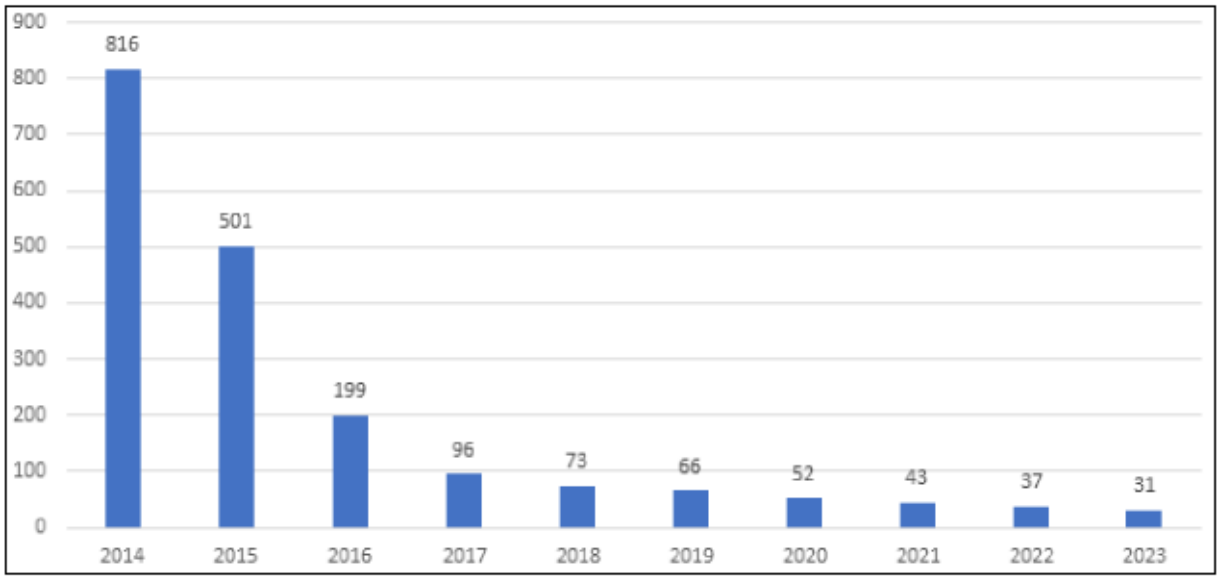



*Рисунок 4 – Суммы подозрительных операций с признаками вывода денег за рубеж, млрд руб. [24]*

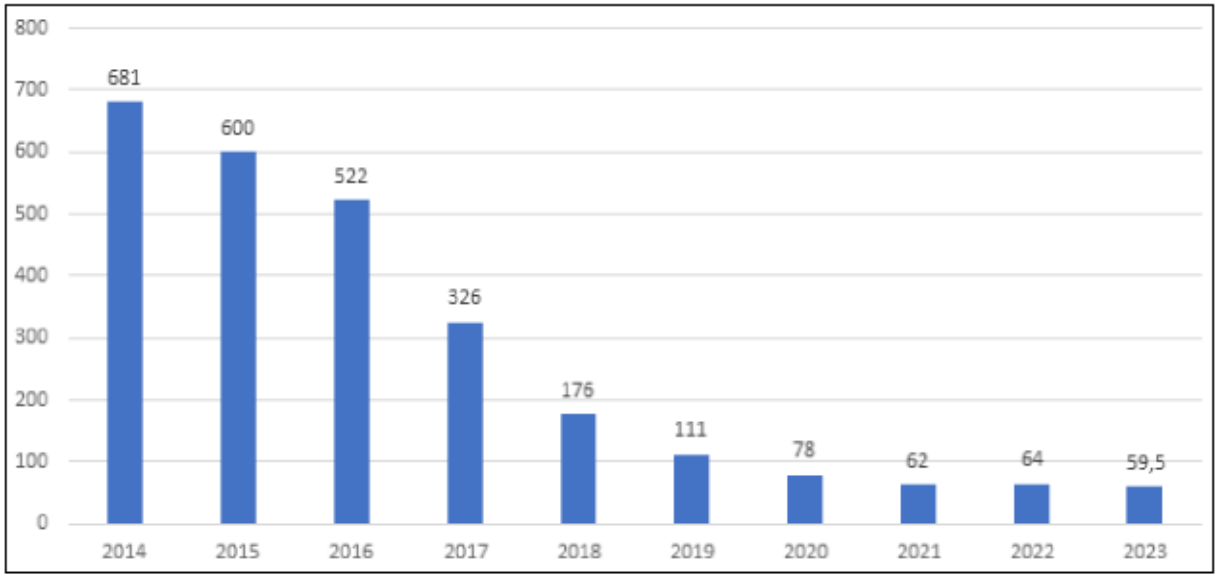



*Рисунок 5 – Суммы обналичивания денег в банковском секторе, млрд руб.*

В качестве основания для вывода денег за рубеж в 2023 году, как и в предыдущие годы, в основном использовались авансовые платежи на импортируемые товары без их последующего ввоза на территорию Российской Федерации (57 %).

Суммы обналичивания денег во всех секторах экономики в 2023 году сократились по сравнению с прошлым годом на 11%, а в банковском секторе – на 6%. Оперативное выявление высоко рисковых клиентов с помощью Платформы Банка России «Знай своего клиента» и оперативное пресечение их операций позволило почти в три раза сократить объемы обналичивания по платежным картам юридических лиц. Также в три раза снижены объемы подозрительных операций по исполнительным документам.

Но в этой связи недобросовестными участниками хозяйственной деятельности более активно стали использоваться схемы обналичивания через банковские карты и счета физических лиц, на которые безналичные денежные средства поступали от юридических лиц и индивидуальных предпринимателей, не ведущих реальную хозяйственную деятельность. Основной спрос на теневые финансовые услуги в 2023 году, как и в прошлом, формировался в строительной отрасли (37%), торговле (26%) и сфере услуг (21%).

**Обсуждение.** В [16] отмечается, что количество индикаторов риска увеличилось в 2 раза: со 187 в 2022 году до 412 в 2023 году. Запланировано принятие еще минимум 90 новых индикаторов. Федеральными регуляторами разработаны и доведены до региональных контролеров перечни типовых индикаторов риска по отдельным сферам регионального контроля. Продолжается цифровизация контрольной деятельности, что позволяет оперативнее реагировать на проблемы бизнеса и граждан.

Удалось добиться значительного прогресса в переходе на риск-ориентированную модель организации проверок, что уже принесло впечатляющие результаты в виде повышения их эффективности и снижения необоснованной нагрузки на бизнес. В среднем в 85 случаях из 100 проверок на основании индикаторов риска первоначальные предположения федеральных органов контроля о нарушениях полностью подтверждаются, а для проверок по другим основаниям этот показатель составляет порядка 60%. Открытость и публичность индикаторов риска – это залог справедливости и объективности нового прогрессивного подхода при осуществлении государственного финансового контроля. Важно, чтобы индикаторы риска заняли ключевое место во внеплановых проверках, а их результативность стала максимальной. В конечном итоге за счет этого проверка будет не элементом наказания, а инструментом создания условий, при которых предпринимателям экономически выгоднее работать честно, соблюдая правила.

В результате создаются благоприятные условия для ведения бизнеса, что выгодно самим предпринимателям и экономике страны в целом. В частности, уже запущен этап внедрения дистанционных проверок с помощью современных цифровых инструментов. Проведение оценки соблюдения требований законодательства без выезда – один из этапов эволюции процедур государственного контроля.

Продолжает действовать мораторий на проверки. Контролёры приходят только на объекты, где потенциально есть угроза жизни и здоровью человека. Растет число профилактических визитов, когда бизнесу помогают предотвратить нарушение, а не штрафуют за него. Продолжается цифровизация самой системы контроля. Актуализируется нормативную базу. Продолжаем внедрять системы управления рисками и их индикаторов: переходим на умные проверки. За 2 года их число уже выросло в 14 раз, в прошлом году их провели более восьми тысяч. Самих индикаторов риска по всем видам контроля на сегодня более 400, половина из них заработали в 2023 году. Главная задача 2024 года: не только закрепить результаты уже проделанной работы, но и обеспечить выполнение обязательных требований при минимальной «надзорной» нагрузке на добросовестных предпринимателей, реагируя в отношении нарушителей. Повысить уровень доверия к системе контроля и создать максимально комфортные условия для развития частной инициативы.

Финансовый контроль играет ключевую роль и в успешной реализации государственных проектов. Это, в первую очередь, проекты, направленные на развитие образования и здравоохранения, строительство линейной инфраструктуры и т.п. Зачастую такие проекты требуют огромных вложений денежных ресурсов и огромного количества времени. Однако всё это ведет к улучшению качества жизни населения страны. Грамотный финансовый контроль позволяет оперативно корректировать планы в ходе их исполнения и достигать поставленных целей. Эффективное управление финансами требует учета особенностей государственных проектов, таких как масштабность, политическая значимость и долгосрочное планирование. Основные факторы успеха состоят в ясном понимании цели и задач, оценке всех затрат и рисков, прозрачности и ответственности за использование бюджета. Примеры успешных проектов показывают, что при правильном подходе и строгом контроле можно достичь значительных результатов и улучшить качество жизни граждан.

**Выводы.** Важность финансового контроля в системе управления неоспорима, ведь благодаря нему происходит обеспечение не только прозрачности финансовых потоков, но и соблюдение законодательных норм. Причем залогом успеха проводимых преобразований является активное вовлечение предпринимателей в этот процесс, их конструктивный диалог с надзорными органами и готовность к саморегулированию. Только совместными скоординированными усилиями государственных органов и делового сообщества можно в полной мере реализовать колоссальный потенциал обновленной модели контрольно-надзорной деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Андреев С.А. Создание финансовой архитектуры безопасности в федеральных органах исполнительной власти. // Финансовое право. – 2023. – № 6. – С. 11-13.
2. Антропцева И.О. Банк России как орган публичного финансового контроля. // Банковское право. – 2024. – № 3. – С. 33-39.
3. Антропцева И.О. Проблемы правового регулирования внутреннего финансового контроля на уровне субъектов Российской Федерации и муниципальных образований. // Финансовое право. – 2023. – № 10. – С. 10-13.
4. Антропцева И.О. Цифровая экосистема государственного аудита Счетной палаты Российской Федерации. // Финансовое право. – 2024. – № 2. – С. 2-5.
5. Артамонова В.Н. Контроль за реализацией национальных проектов. // Финконтроль. – 2021. – № 2. https://rufincontrol.ru/online/article/424107.
6. Архиреева А.С., Едиджи Ф.А. Проблемы развития финансового контроля. // Научный журнал «Эпомен». – 2020. –№ 36. – С. 17-24.
7. Булыга Р.П. Классификация и стандартизация финансового контроля и аудита в Российской Федерации. // Учет. Анализ. Аудит. – 2017. – № 5. – С. 10-17.
8. Быковская Ю.В. Проблемы финансового контроля в современной России и пути их решения // Вестник экономической безопасности. – 2019. – № 1. – С. 202-209.
9. Бычков В.В. Актуальные вопросы финансового контроля. // Финконтроль. – 2024. – № 1. https://rufincontrol.ru/online/article/482129.
10. Волков А.Ю. Финансовый контроль как категория. // Экономика, статистика и информатика. – 2014. – № 6 (2). – С. 394-398.
11. Волкова О.В., Щеглов В.Ю., Скворцов А.О. Проблемы финансового контроля в Российской Федерации. // Вестник Пензенского государственного университета. – 2021. – № 1. – С. 39-41.
12. Григорьев А.В., Голод К.К. К вопросу о сущности финансового контроля // Журнал прикладных исследований. – 2020. – №4. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-o-suschnosti-finansovogo-kontrolya.
13. Климанов В.В., Казакова С.М., Михайлова А.А. Функции высших органов государственного аудита (контроля) в России и зарубежных странах. // Финансовый журнал. – 2019. – № 4. – С. 60-74.

14. Концепция совершенствования контрольной (надзорной) деятельности до 2026 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 21.12.2023 года № 3745-р. – 54 с.

15. Литвиненко А.Н., Самойлова Л.К. Организационно-правовые аспекты формирования на предприятии системы внутрихозяйственного финансового контроля. // Вестник Санкт-Петербургского университета МВД России. – 2017. – № 1 (73). – С. 70-77.

16. Сводный доклад о государственном контроле (надзоре), муниципальном контроле в Российской Федерации в 2023 году. // http://static.government.ru/media/files/2DNnx-6TUMbQCQOPU5Q6koVdJkIFEAirX.pdf.

17. Симко М.М. Алгоритм осуществления внутреннего государственного финансового контроля Казначейством России: проблемы и пути решения. // Финансы: теория и практика. – 2020. – Т. 24. – № 6. – С. 123-139.

18. Ситник А.А. Финансовый контроль и надзор в сфере денежного обращения в Российской Федерации: монография. // М. Проспект – 2020. – 240 с.

19. Храмченко А.А., Коровин Д.А., Горбенко Е.А. Актуальные проблемы системы финансового государственного контроля и пути их решения. // Естественно-гуманитарные исследования. – 2021. – № 36 (4). – С. 266-271.

20. Хомушку В.К. Внешний финансовый контроль в Российской Федерации: сущность и правовые основы. // Вестник университета. – 2019. – № 3. – С. 151-157.

21. Царева Л.М. Направления развития партнерских взаимоотношений при внедрении новых методов внутреннего государственного финансового контроля. // Местное право. – 2024. – № 4. – С. 28-35.

22. Шмалий О.В. Счетная палата Российской Федерации как орган финансового контроля. // Бизнес в законе. Экономико-юридический журнал. – 2016. – № 6. – С. 339-342.

23. Федеральный закон от 31.07.2020 № 248-ФЗ «О государственном контроле (надзоре) и муниципальном контроле в Российской Федерации».

24. Банк России. Официальный сайт. Режим доступа: https://www.cbr.ru/counteraction_m_ter/ (дата обращения: 17.11.2024).

*Статья поступила в редакцию 23.11.2024*
*Статья принята к публикации 13.12.2024*

УДК 664.6
EDN: JPHKJV

# ПРИГОТОВЛЕНИЕ РАСТВОРОВ, ЭМУЛЬСИЙ И СУСПЕНЗИЙ В СМЕШИВАЮЩЕМ АППАРАТЕ С ПУЛЬСАЦИОННОЙ КАМЕРОЙ И МНОГОСОПЛОВЫМ УСТРОЙСТВОМ

© Автор(ы) 2024

SPIN: 9220-0752
AuthorID: 254439
ORCID: 0000-0001-6623-7228

**АВРОРОВ Валерий Александрович**, доктор технических наук,
профессор кафедры «Пищевые производства»
*Пензенский государственный технологический университет*
*(440028, Россия, г. Пенза, пр. Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11, e-mail:v_avrorov@bk.ru)*

SPIN:4884-0473
AuthorID: 839818
ORCID: 0000-0001-7952-359X

**САРАФАНКИНА Елена Александровна**, старший преподаватель кафедры «Пищевые производства»
*Пензенский государственный технологический университет*
*(440028, Россия, г. Пенза, пр. Байдукова / ул. Гагарина, 1а/11, e-mail:satel18@mail.ru)*

SPIN: 8595-4447
AuthorID: 839997
ORCID: 0000-0003-3506-3303

**МУРАШКИНА Оксана Александровна**, старший преподаватель кафедры «Пищевые производства»
*Пензенский государственный технологический университет*
*(440028, Россия, г. Пенза, пр. Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11, e-mail:xenian13@yandex.ru)*

**Аннотация.** В статье проведен анализ процесса перемешивания неоднородных жидких сред (пищевых эмульсий и суспензий) гидродинамическим способом в цилиндрическом вертикальном смесителе, оснащенном пульсационной камерой и многосопловым устройством. Технологический процесс перемешивания используется во всех отраслях пищевой промышленности с целью равномерного распределения частиц по всему объему жидкой среды. Пульсационные аппараты применяют для получения гомогенизированных жидких эмульсий и суспензий, высокодиспергированных систем и многокомпонентных составов при использовании трудносмешиваемых компонентов. Такие аппараты включают в состав технологических линий или используют в виде автономных установок. При изучении вопросов процесса перемешивания учитываются интенсивность, эффективность и расход энергии на проведение процесса. Преимуществом смесителей с пульсационными камерами и сопловыми устройствами по сравнению с наиболее распространенными гидромеханическими смесителями жидких сред является отсутствие вращающихся механических мешалок и источников движения для их привода. Рассмотрены условия, характеризующие движение жидкой среды при периодической подаче сжатого воздуха в рабочее пространство смесителя, представляемого в виде системы с переменными массами. Низкочастотные колебания жидкости в зоне смешивания генерируются отдельным пневмомеханическим роторным пульсатором и вызывают ее турбулентное движение, ведущее к интенсивному перемешиванию дисперсной фазы эмульсии или суспензии в жидкой дисперсионной среде. Определены аналитические зависимости и числовые значения, определяющие основные режимные параметры процесса приготовления и перемешивания растворов, эмульсий и суспензий.

**Ключевые слова:** гидродинамический смеситель, пульсационная камера, многосопловое устройство, пульсатор, приготовление и перемешивание растворов и неоднородных жидких сред.

# PREPARATION OF SOLUTIONS, EMULSIONS AND SUSPENSIONS IN A MIXING APPARATUS WITH A PULSATION CHAMBER AND A MULTI-NOZZLE DEVICE

© The Author(s) 2024

**AVROROV Valery Alexsandrovich**, doctor of technical sciences, professor of the department of "Food production"
*Penza State Technological University*
*(440028, Russia, Penza, pr.Baidukova/Gagarin st. 1a/11, e-mail: v_avrorov@bk.ru)*

**SARAFANKINA Elena Alexsandrovna,** master, senior lecturer of the department "Food production"
*Penza State Technological University*
*(440028, Russia, Penza, pr.Baidukova/Gagarin st. 1a/11, e-mails: satel18@mail.ru)*

**MURASHKINA Oxana Alexsandrovna**, master, senior lecturer of the department of "Food production"
*Penza State Technological University*
*(440028, Russia, Penza, pr.Baidukova/Gagarin st. 1a/11, e-mail: xeniam13@yandex.ru)*

**Abstract.** The article analyzes the process of mixing inhomogeneous liquid media (food emulsions and suspensions) by a hydrodynamic method in a cylindrical vertical mixer equipped with a pulsation chamber and a multi-nozzle device.

The mixing process is used in all branches of the food industry in order to evenly distribute particles throughout the entire volume of the liquid medium. Pulsating devices are used to produce homogenized liquid emulsions and suspensions, highly dispersed systems and multicomponent compositions using difficult-to-mix components. Such devices are included in technological lines or used as stand-alone installations. When studying the issues of the mixing process, the intensity, efficiency and energy consumption of the process are taken into account. The conditions characterizing the movement of a liquid medium with periodic supply of compressed air into the working space of the mixer are considered. represented as a system with variable masses. Low-frequency vibrations of the liquid in the mixing zone are generated by a separate pneumomechanical rotary pulsator and cause its turbulent movement, leading to intensive mixing of the dispersed phase of the emulsion or suspension in a liquid dispersion medium. Analytical dependences and numerical values determining the main operating parameters of the process of preparation and mixing of solutions, emulsions and suspensions are determined.

**Keywords:** hydrodynamic mixer, pulsation chamber, multi-core device, pulsator, preparation and mixing of solutions and inhomogeneous liquid media.

*Для цитирования: Авроров В.А. Приготовление растворов, эмульсий и суспензий в смешивающем аппарате с пульсационной камерой и многосопловым устройством / В.А. Авроров, Е.А. Сарафанкина, О.А. Мурашкина // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 4(68). – С. 124-129. – EDN: JPHKJV.*

**Введение.** Для приготовления растворов, эмульсий и суспензий и улучшения их свойств в пищевой и других отраслях промышленности широко используются специальные смешивающие устройства различного принципа действия и конструктивного исполнения.

К ним относятся смешивающие аппараты с лопастными, турбинными, пропеллерными, якорными, шнековыми и другими видами мешалок [1-5]; роторные высокоскоростные диспергаторы [6-9]; циркуляционные аппараты с проточными котлами [10-13]; смесители с пульсационными камерами и многосопловыми устройствами [14-15] а также аппараты с перфорированными круглыми дисками, совершающими взбалтывающее короткоходовое возвратно-поступательное движение от коленчатого вала или соленоидного низкочастотного вибропривода.

Преимуществом смесителей с пульсационными камерами и сопловыми устройствами по сравнению с наиболее распространенными гидромеханическими смесителями жидких сред является отсутствие вращающихся механических мешалок и источников движения для их привода. К возможным недостаткам можно отнести относительно небольшой коэффициент полезного действия и определенные трудности эмульгирования вязких сред, низкую эффективность перемешивания грубодисперсных суспензий и наличие дополнительных устройств, размещенных вне аппарата.

Движущей силой процесса в таких аппаратах является периодически изменяемое давление сжатого воздуха, подаваемого в рабочее пространство смесителя от внешних исполнительных органов (пульсатора, ресивера и компрессора) и вызывающее турбулентный режим движения жидкой среды (рис.1).

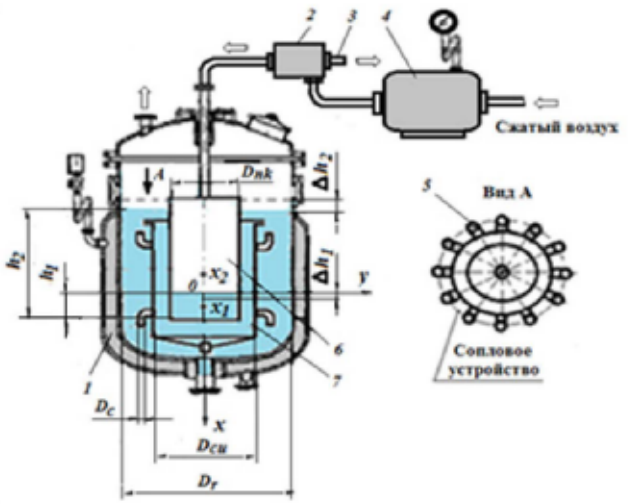



*Рисунок 1 – Схема пульсационного смешивающего аппарата:*
*1 – паровая рубашка, 2 – роторный пульсатор, 3 – штуцер выхлопа, 4 – ресивер,*
*5 – сопло, 6 – пульсационная камера, 7 – сопловое устройство.*
*$D_r$ – диаметр реактора, $D_{nk}$ – диаметр пульсационной камеры, $D_{cu}$ – диаметр многосоплового устройства,*
*$D_c$ – диаметр сопла, $h_1$, $h_2$ – высота жидкости в камере и в корпусе реактора соответственно,*
*$x_1$, $x_2$ – координаты центра масс жидкости в камере и в корпусе соответственно*
*$\Delta h_1$, $\Delta h_2$ – отклонения от равновесного положения уровня жидкости в камере и в корпусе соответственно*

Низкочастотные колебания жидкости генерируются вращающимся ротором пневмомеханического пульсатора 2. В канал ротора подается из ресивера 4 сжатый воздух и при вращении последнего канал периодически соединяется то с пульсационной камерой 6, то с атмосферой, что вызывает колебания уровня жидкости в камере и в рабочей емкости смесителя. Давление воздуха заставляет ее поступать в кольцевой зазор между наружными стенками пульсационной камеры и внутренними стенками соплового устройства 7. При сбросе давления в атмосферу через штуцер 3 жидкая среда из корпуса смесителя начинает вновь заполнять пульсационную камеру, и цикл перемешивания повторяется.

При необходимости в зависимости от свойств перемешиваемых жидких сред корпус аппарата может оснащаться паровой рубашкой.

**Методология.** Условия движения и параметры, характеризующие состояние перемешиваемой жидкости в рабочем пространстве смесителя, рассматривались нами в виде системы с периодически изменяемыми массами жидкой среды в пульсационной камере и корпусе смесителя [16].

Цель настоящей работы заключалась в определении параметров гидродинамического колебательного процесса приготовления растворов и перемешивания неоднородных жидких сред (пищевых суспензий и эмульсий) в вертикальном цилиндрическом смесителе с учетом действия внешних нагрузок и сил сопротивления

Пусть в момент действия импульса давления воздуха положение центра масс жидкости относительно начала координат определяется текущей координатой *x1* в пульсационной камере и *x2* в корпусе смесителя.

Связь между этими двумя координатами может быть записана как

$2(x_2 S_2 + x_1 S_1)=h_1 - h_2$

или

$$x_1=(x_1 - x_2) / (2S_2) - x_1 S_1 / S_2, \quad (1)$$

где $h_1$, $h_2$ – высота жидкости в камере и в корпусе смесителя в состоянии равновесия соответственно, м;

$S_1$, $S_2$ – площадь поперечного сечения камеры и кольцевого пространства корпуса смесителя соответственно, м$^2$.

На жидкую среду в камере и в корпусе смесителя будут действовать следующие силы:

– сила давления воздуха $F_{p1}=p_1 S_1$ и $F_{p2}=p_2 S_2$,

где $p_1$, $p_2$ – давление в камере и в корпусе смесителя соответственно, Па;

– сила тяжести жидкости $F_{m1}=m_1 g$ и $F_{m2}=m_2 g$,

где $m_1$, $m_2$ – масса жидкости в камере и в корпусе смесителя соответственно;

– сила трения жидкости при ее перемещении $F_{mp1} = \tau_1 P_1 (h_1 - \Delta h_1)$ и $F_{mp2} = \tau_2 P_2 (h_2 - \Delta h_2)$,

где $\tau_1$, $\tau_2$ – касательные напряжения в пограничном слое жидкости на стенках камеры и корпуса смесителя соответственно, Н/м$^2$;

$P_1$, $P_2$ – смоченный периметр камеры и корпуса реактора соответственно, м;

$\Delta h_1$, $\Delta h_2$ – отклонение уровня жидкой среды в камере и в корпусе от равновесного положения соответственно, $\Delta h_1 = 2x_1$; $\Delta h_2=2x_1 S_1 / S_2$.

Величина касательных напряжений определяется как $\tau_1 = (\lambda_1 \rho \dot{x}_1^2)/8$, $\tau_2 = (\lambda_2 \rho \dot{x}_2^2)/8$,

где $\lambda_1$, $\lambda_2$ – коэффициенты гидравлического трения в камере и корпусе смесителя;

$\rho$ – плотность жидкой среды [17,18];

– сила местного сопротивления в пульсационной камере $F_{mc}$, возникающая в результате сопротивления движению жидкости в кольцевом зазоре между корпусом и сопловым устройством, равна, $F_{mc} = \Delta p_{mc} S_1$,

где $\Delta p_{mc}$ – гидравлическое сопротивление, Па; $\Delta p_{mc} = \frac{\zeta_{nk} \rho \dot{x}_1^2}{2}$,

$\zeta_{nk}$ – коэффициент местного сопротивления камеры, отнесенный к скорости движения жидкой среды $\dot{x}_1$.

Предположим, что в какой-то момент $t_1$ из интервала времени $\Delta t = t_2 - t_1$, где $t_1$, $t_2$ время начала и окончания подачи сжатого воздуха в камеру, изменения масс жидкости и воздуха в гидродинамической системе не происходит, т.е. система принимается как бы «застывшей», но сохраняющей те же параметры движения, что и система с переменными массами.

Уравнения движения такой системы могут быть представлены в зависимости от числа степеней ее свободы рядом дифференциальных уравнений Лагранжа II рода [19]

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial E_k}{\partial q_i} = \sum F_i + \sum R_i, \quad (2)$$

где $E_k$ – кинетическая энергия гидродинамической системы;

$q_i$ – $i$-ая обобщенная координата;

$\dot{q}_i$ – $i$-ая обобщенная скорость;

$t$ – время;

$\sum F_i$, $\sum R_i$ – сумма активных и реактивных сил, действующих на систему.

В данном случае исследуемая система имеет одну степень свободы, и ее движение определяется одним уравнением Лагранжа, в котором за обобщенную координату принята координата $x_1$.

Кинетическая энергия рассматриваемой системы равна

$$E_k = \frac{1}{2}(m_1 \dot{x}_1^2 + m_2 \dot{x}_2^2)$$

Поскольку $\dot{x}_2 = -\dot{x}_1 \frac{S_1}{S_2}$, то $E_k = \frac{1}{2}\left[m_1 + m_2 \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^2\right] \dot{x}_1^2$

и $\frac{\partial E_k}{\partial x_1} = \left[m_1 + m_2 \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^2\right] \dot{x}_1$,

откуда

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial E_k}{\partial x_1} = [m_1 + m_2 \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^2] \ddot{x}_1 \quad (3)$$

Виртуальная работа активных сил $F_i$ на перемещениях $\delta x_1$ и $\delta x_2$ равна

$$\delta A_F = \delta x_1 (F_{p1x} + F_{m1x} + F_{mp1x} + F_{mcx}) + \delta x_2 (F_{p2x} + F_{m2x} + F_{mp2x}) \quad (4)$$

где $\delta x_2 = - S_1 / S_2 \delta x_1$;

$F_{p1x}$, $F_{p2x}$; $F_{m1x}$, $F_{m2x}$; $F_{mp1x}$, $F_{mp2x}$; $F_{mcx}$ – проекции активных сил на ось $0x$.

Обобщенная активная сила равна $F = \delta A_F / \delta x_1$.

При поступательном (не импульсном) движении жидкой среды реактивные силы равны

$R_i = -\sum m_i a_i$ ,

где $m_i$ – масса жидкости в камере ($i = 1$) и в корпусе смесителя ($i = 2$), кг;

$m_1 = \rho S_1 (h_1 - \Delta h_1)$;

$m_2 = \rho S_2 (h_2 - \Delta 2h_1)$;

$a_i$ – ускорение масс относительно системы) координат, м/с$^2$.

Проекция равнодействующей сил реакции на ось $0x$ равна

$R_{0x} = -m_1 \ddot{x}_1 - m_2 \ddot{x}_2$,

где $\ddot{x}_2 = -S_1 / S_2 \ddot{x}_1$

или

$$R_{0x} = -m_1 \ddot{x}_1 - m_2 (S_1 / S_2) \ddot{x}_1. \quad (5)$$

Виртуальная работа сил реакции на виртуальных перемещениях и запишется в виде

$$\delta A_B = -\left(m_1 + m_2 \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^2\right) \ddot{x}_1 \delta x_1, \quad (6)$$

а обобщенная реактивная сила определится как

$$R = -\left(m_1 + m_2 \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^2\right) \ddot{x}_1. \quad (7)$$

**Результаты.** Подставив найденные выше выражения в уравнение (2) и проведя соответствующие преобразования, получим дифференциальное уравнение второй степени, описывающее колебания жидкой среды в гидродинамической системе пульсационного смесителя с переменными массами, нелинейным сопротивлением и нелинейной восстанавливающей силой:

$$m_{np} \ddot{x}_1 + k_{np,c} |\dot{x}_1| \dot{x}_1 + c_{np} x_1 = Q_{np}, \quad (8)$$

где $m_{пр}$ – приведенная масса системы

$$m_{np} = 2\rho S_1 (h_1 + \frac{S_1}{S_2} h_2 - 2x_1 (1 - \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^2);$$

$k_{пр.с}$ – приведенный коэффициент сопротивления

$$k_{np.c} = \frac{1}{2} \rho S_1 \left[ \lambda_1 \frac{h_1 - 2x_1}{D_{kan\ эк}} + \lambda_2 \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^2 \frac{h_2 + 2\frac{S_1}{S_2} x_1}{D_{kop\ эк}} + \zeta_{nk} \right],$$

$D_{кан\ эк}$, $D_{кор\ эк}$ – эквивалентные диаметры пульсационной камеры и корпуса смесителя соответственно

$D_{кан\ эк} = 4S_1 / P_1$, $D_{кор\ эк} = 4S_2 / P_2$;

$c_{пр}$ – приведенная жесткость системы

$$c_{np} = 2\rho S_1 (1 - \frac{S_1}{S_2}) g;$$

$Q_{пр}$ – приведенная вынуждающая сила

$Q_{пр} = S_1 [(p_1 - p_2) + pg(h_1 - h_2)]$.

Из уравнения (8) следует, что собственная частота колебаний гидромеханической системы будет зависеть от отношения приведенной жесткости системы к ее приведенной массе

$$f_c = \sqrt{\frac{c_{np}}{m_{np}}}$$

или

$$f_c = \sqrt{\frac{(1 + \frac{S_1}{S_2}) g}{h_1 + \frac{S_1}{S_2} h_2 - 2x_1 (1 - \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^2)}}, \text{ с}^{-1}. \quad (9)$$

**Обсуждение.** В выражения приведенной жесткости и массы входят конструктивные параметры смесителя: $S_1$ – площадь поперечного сечения пульсационной камеры и $S_2$ – площадь поперечного сечения кольцевого пространства между наружным диаметром камеры и внутренним диаметром корпуса смесителя.

Чем больше будет площадь сечения пульсационной камеры, тем будет больше масса жидкости в смесителе и частота колебаний системы, что положительно скажется на его пропускной способности по конечному продукту.

Приведенная сила, вынуждающая колебания жидкой среды в смесителе при подаче сжатого воздуха от пульсатора и способствующая лучшему ее перемешиванию, прямо пропорциональна площади поперечного сечения камеры и сумме разности давлений жидкости в камере и корпусе смесителя и плотности, умноженной на разность высот уровней жидкости.

В начальный момент времени при равенстве уровней жидкой среды в камере и в корпусе $h_1 = h_2$, принимая, что в этот момент подкоренное выражение из (9) $2x_1(1 - (S_1 / S_2)^2)$ равным нулю, частоту собственных колебаний системы можно определить как

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{h_1}}. \quad (10)$$

Скорость движения жидкой среды на выходе из отверстий соплового устройства камеры при действии импульса давления от пульсатора

$$\omega_{cn} = 2 \frac{AS_1}{ntS_c}, \quad (11)$$

где $A$ – амплитуда колебаний уровня жидкой среды в пульсационной камере, с;

$t$ – время снижения уровня жидкости в камере, $t = (02 - 04) f_c$, $f_c$ – частота пульсаций, Гц;

$S_c$ – площадь поперечного сечения сопла, м$^2$;

$n$ – число сопел в сопловом устройстве камеры

ПРИМЕР. Определение параметров процесса приготовления раствора бутилового спирта $C_4H_9OH$, который используется как растворитель при получении экстрактов из растительного сырья (табл. 1).

Отношение площадей, занимаемых сопловым устройством и пульсационной камерой:

$$k_D = \frac{D_{cu}^2 - D_{nk}^2}{D_{nk}^2} = 0{,}72.$$

Безразмерный параметр отношения диаметров соплового устройства и пульсационной камеры:

$$r_1 = \frac{D_{cu}}{D_{nk}} = 1{,}31.$$

*Таблица 1 – Исходные данные для расчета*

| Наименование параметра реактора | Значение |
|---|---|
| Диаметр корпуса реактора, $D_k$, мм | 460 |
| Диаметр пульсационной камеры, $D_{пк}$, мм | 160 |
| Диаметр соплового перемешивающего устройства, $D_{сх}$, мм | 210 |
| Количество сопел в ряду соплового устройства и число рядов | 12/2 |
| Внутренний диаметр сопла, $D_c$, мм | 6 |
| Начальное давление в пульсационной камере $p_1$ и в корпусе реактора $p_2$, кПа | 105 |
| Масса жидкой среды в корпусе реактора, $m_{bw}$, кг | 42,8 |
| Массовое содержание воды, $M$, % | 12,2 |
| Плотность жидкой среды с учетом плотности и содержания бутилового спирта, $\rho_b$, кг/м$^3$ | 810 |
| Динамическая вязкость жидкой среды, $\mu$, Па·с | $0{,}45\cdot10^{-3}$ |
| Высота столба жидкости в пульсационной камере, $h_1$, мм | 240 |

Коэффициент сопротивления пульсационной камеры:

$$\zeta_{пк} = \zeta_r + 3\left(\frac{D_{пк}^2}{nD_c^2}\right)^2 = 2634{,}2$$

где $n = 24$ – суммарное количество сопел в сопловом устройстве; $\zeta_r = 3{,}1$ – коэффициент сопротивления кольцевого зазора.

Частота пульсации жидкой среды:

$$f_c = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{h_1}} = 1{,}02 \approx 1 \text{ Гц.}$$

Плотность жидкой среды в реакторе:

$$\rho_{ср} = \left(\frac{M/100}{\rho_{вод}} + \frac{1-M/100}{\rho_б}\right)^{-1} \text{ кг/м}^3$$

где $\rho_{вод} = 1000$ кг/м$^3$ – плотность воды.

Объемная доля воды :

$$M_{вод} = \frac{M}{100}\frac{\rho_b}{\rho_{вод}} = 0{,}098.$$

Объем жидкой среды в реакторе:

$$V = \frac{m_{bw}}{\rho_{ср}} = 0{,}05; \text{ м}^3.$$

Минимальная амплитуда колебания жидкой среды в пульсационной камере:

$$2A_{пк\min} = \frac{4V_k}{\pi D_{пк}^2} = 0{,}06 \text{ м,}$$

где $V_k = 1{,}25\cdot10^{-3}$ – объем жидкой среды, выходящей из камеры вследствие кратковременного изменения давления воздуха, м$^3$.

Время воздействия импульса давления на жидкую среду:

$$\Delta t = \frac{4V_k}{\pi D_c^2 n v_n} = 0{,}625 \text{ с}$$

где $v_n$ – скорость потока жидкости в соплах, $v_n = 3$ м/с.

С целью улучшения однородности состава перемешиваемой среды, учитывая сопротивление истечению жидкости из пульсационной камеры и соплового устройства и время на обратное заполнение камеры при сбросе давления воздуха, принимаем время соединения канала пульсатора с атмосферой (время выхлопа) равным $t_{вых} = 6\,\Delta t = 3{,}75 \approx 4$ с. .

**Выводы.** Достоинства пульсационных перемешивающих аппаратов заключаются в отсутствии механических движущихся частей и щадящем воздействии на частицы дисперсной фазы обрабатываемых жидких сред. К их недостаткам можно отнести ограничение возможностей качественного перемешивания грубодисперсных суспензий с неоднородным гранулометрическим составом частиц дисперсной фазы, обусловленное недостаточной степенью воздействия гидродинамических сил на крупные частицы.

Частота и амплитуда колебаний перемешиваемых сред в пульсационном смесителе зависит главным образом от частоты вращения ротора пульсатора и от величины давления воздушного потока перед пульсатором. Время воздействия на жидкую среду импульса давления в пульсационной камере зависит от скорости потока жидкости в соплах, от их диаметра и количества в сопловом устройстве.

Режимные параметры процесса пульсационного перемешивания жидких сред полностью определяются задаваемыми конструктивными размерами смесителя, составом и свойствами компонентов перемешиваемых жидких сред.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Авроров В.А. Процессы и аппараты пищевых производств. – Москва-Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. – 800 с.

2. Калошин Ю.А., Березовский Ю.М., Верняева Л.В. Физико-механические свойства сырья и готовой продукции. – М: Московский государственный университет технологии и управления им. Разумовского, 2009. – 168 с.

3. Авроров В.А. Оборудование предприятий общественного питания и средства его оснащения. – М: ЮРАЙТ, 2022. – 548 с.

4. Авроров В.А. Процессы и оборудование. Моделирование, исследование, инновационные конструкторские разработки. – М: ЮРАЙТ, 2021. – 260 с.

5. Цибизова А.А. Перемешивание жидкостей. http://astg-mu.ru>up-content/uploads/20.05.2020/. Электронный ресурс.

6. Авроров В.А. Основы проектирования технологического оборудования пищевых производств. – Москва-Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 496 с.

7. On High-Speed Rotary Dispersion of Liquid Media / V. Avtorov // Том: 55, Выпуск 9-10. стр. 704-709. DOI 10.1007/sAvtorov V.A.10556-020-00695-x. jan.2020 / Издатель:SPRINGER, ONE NEW YORK PLAZA, SUIT 4600, NEW YORK, NY, UNITED STATES.

8. Analysis of the Motion of Fluid in the Annular Gap between the Rotor and Stator of a High-Speed Disperser / V. Avtorov // Том: 55, Выпуск 11-12, стр. 951-957.DOI 10.1007/s10556-020-00719-6.mar.2020 / Издатель: SPRINGER, ONE NEW YORK PLAZA, SUIT 4600, NEW YORK, NY, UNITED STATES.

9. Analysis of Dispersed Liquid Medium Motion in Rotor and

Stator Holes / V. Avtorov // Том: 56, Выпуск 1-2, стр. 100-104. DOI 10.1007/s10556-020-00745-4 maj.2020 / Издатель: SPRINGER, ONE NEW YORK PLAZA, SUIT 4600, NEW YORK, NY, UNITED STATES.

10.Тутов Н.Д., Авроров В.А. Об энергосберегающем способе нагревания растворов в промышленных резервуарах без механического перемешивания / Химическое и нефтегазовое машиностроение, № 11, 2016. – С. 9-10.

11. Авроров Г.В. и др. Способ нагрева снаружи поверхности круглого днища неподвижной тонкостенной цилиндрической емкости, установленной вертикально. Патент РФ №2411699, 2011.

12. Авроров Г.В. и др. Способ нагрева жидкости в вертикально установленной неподвижной емкости с плоским днищем, высота которой больше размеров днища. Патент РФ № 2442935, 2012.

13. Авроров Г.В. и др. Способ получения растворов в цилиндрической вертикальной емкости, нагреваемой со стороны днища. Патент РФ № 2486950, 2013.

14. Рябчиков Б.Е. Пульсационные перемешивающие устройства для приготовления реагентов / Водоснабжение и санитарная техника, №2, 2017.

15. Промтов М.А. Машины и аппараты с импульсными энергетическими воздействиями на обрабатываемые вещества. – М.: Издательство Машиностроение-1, 2004. – 136 с.

16. Новоселов В.С. Аналитическая механика систем с переменными массами. – Л: Издательство Ленинградского университета, 1969. – 238 с.

17. Моргунов К.П. Механика жидкости и газа. 4-е изд. стер: учебное пособие для вузов – С.Пб: Изд. Лань, 2023. – 208 с.

18. Альтшуль А.Д., Киселев П.Г. Гидравлика и аэродинамика (основы механики жидкости. – М: Стройиздат, 1975. – 328 с.

19. Яворский Б.М., Детлаф А.А., Лебедев А.К. Справочник по физике. Для инженеров и студентов вузов. – М: Мир и Образование, 2023. – 1058 с.

*Статья поступила в редакцию 30.09.2024*
*Статья принята к публикации 13.12.2024*

УДК 664.6, 579.67
EDN: JVWOCJ

# ЗАКВАСОЧНЫЕ КУЛЬТУРЫ МОЛОЧНОКИСЛЫХ БАКТЕРИЙ С ПОВЫШЕННЫМИ АНТАГОНИСТИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ ДЛЯ ХЛЕБОПЕКАРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

© Автор(ы) 2024

SPIN: 5612-6758
AuthorID: 343210
ORCID: 0000-0002-2211-8742
ScopusID: 57193998346

**КИТАЕВСКАЯ Светлана Владимировна,** доктор технических наук,
доцент кафедры «Технология пищевых производств»
*Казанский национальный исследовательский технологический университет,*
*(420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68, e-mail: kitaevskayas@mail.ru)*

SPIN: 8560-1552
AuthorID: 685903
ORCID: 0000-0001-5322-0769

**РЕШЕТНИК Ольга Алексеевна,** доктор технических наук,
профессор кафедры «Технология пищевых производств»
*Казанский национальный исследовательский технологический университет,*
*(420015, г. Казань ул. К. Маркса, 68, e-mail: roa.olga@mail.ru)*

SPIN: 6196-4707
AuthorID: 1258618
ORCID: 0000-0002-7561-2795

**КАМАРТДИНОВА Дарья Рафаэловна,** аспирант
*Казанский национальный исследовательский технологический университет*
*(420015, г. Казань ул. К. Маркса, 68, e-mail: darya.kamartdinova@mail.ru)*

**Аннотация.** Разработка конкурентоспособных заквасок для пищевой промышленности, отвечающих современным трендам здорового питания и отличающихся высокими функциональными и технологическими свойствами, является актуальной задачей для пищевой биотехнологии. Антагонистическое действие бактерий *Lactobacillus* является важнейшей характеристикой при отборе штаммов для промышленного применения их в качестве заквасочных культур в пищевых технологиях. В данной статье представлены результаты комплексных исследований антагонистической активности новых перспективных штаммов молочнокислых бактерий *p. Lactobacillus*. Установлено, что штаммы *L. bavaricus 3, L. casei 16, L. fermentum 10* и *L. casei 23* обладают высокой антибактериальной активностью, максимальную фунгицидную активность проявляют *L. fermentum 10, L. casei 36, L. plantarum 24* и *L. casei 32*. В ходе проведенных исследований выявлено, что применение заквасок лактобацилл с повышенными антагонистическими свойствами в технологии хлебобулочных изделий позволяет снизить обсемененность готовой хлебопекарной продукции, при этом наибольшей микробиологической чистотой обладают образцы ржано-пшеничного хлеба с использованием заквасок *L. plantarum 24* и *L. casei 32*. Результаты проведенных исследований позволяют рекомендовать *L. casei 32* и *L. plantarum 24* в качестве заквасочных культур с повышенными антагонистическими свойствами для хлебопекарной промышленности.

**Ключевые слова**: молочнокислые бактерии, *Lactobacillus*, антагонистическая активность, заквасочные культуры, хлебопекарная промышленность.

# LACTIC ACID BACTERIA STARTER CULTURES WITH INCREASED ANTAGONISTIC PROPERTIES FOR THE BAKERY INDUSTRY

© The Author(s) 2024

**KITAEVSKAYA Svetlana Vladimirovna,** doctor of technical sciences,
assistant professor at the department of technology of food production
*Kazan National Research Technological University*
*(420015, Kazan, K. Marx str., 68, e-mail: kitaevskayas@mail.ru)*
**RESHETNIK Olga Alexeevna,** doctor of technical sciences,
professor at the Department of technology of food production
*Kazan National Research Technological University*
*(420015, Kazan, K. Marx str., 68, e-mail: roa.olga@mail.ru)*
**KAMARTDINOVA Darya Rafaelovna,** post-graduate student
*Kazan National Research Technological University*
*(420015, Kazan, K. Marx str., 68, e-mail: darya.kamartdinova@mail.ru)*

**Abstract.** The purpose of this work is to evaluate the antagonistic ability of promising strains of lactic acid bacteria for the baking industry. The antagonistic activity of *Lactobacillus* strains was evaluated by the generally accepted meth-

od of diffusion into agar with measurement of the inhibition zone of test cultures of gram-positive and gram-negative bacteria, mycelial fungi and yeast, as well as by the degree of suppression of their growth by starter cultures when co-cultured in a model medium from rye flour. It was found that the strains *L. bavaricus 3, L. casei 16, L. fermentum 10* and *L. casei 23* has high antibacterial activity, *L. fermentum 10, L. casei 36, L. plantarum 24* and *L. casei 32* show maximum fungicidal activity. In the course of the conducted research, it was revealed that the use of lactobacillus starter cultures with increased antagonistic properties in the technology of bakery products makes it possible to reduce the contamination of finished bakery products. The samples of rye-wheat bread with the use of starter cultures *L. plantarum 24* and *L. casei 32* have the highest microbiological purity. The results of the studies show that strains *L. casei 32* and *L. plantarum 24* have a wide spectrum of antibacterial and fungicidal action. This allows us to recommend them as starter cultures with increased antagonistic properties for the baking industry.

**Keywords:** lactic acid bacteria, *Lactobacillus*, antagonistic activity, starter cultures, bakery industry.

*Для цитирования: Китаевская С.В. Заквасочные культуры молочнокислых бактерий с повышенными антагонистическими свойствами для хлебопекарной промышленности / С.В. Китаевская. О.А. Решетник, Д.Р. Камартдинова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 4(68). – С. 130-135. – EDN: JVWOCJ.*

**Введение.** Разработка конкурентоспособных заквасок для пищевой промышленности, отвечающих современным трендам здорового питания и отличающихся высокими функциональными и технологическими свойствами, является актуальной задачей для пищевой биотехнологии.

Производство хлеба на закваске известно с древних времен. Применение закваски в технологии хлебобулочных изделий способствует улучшению технологических характеристик теста, повышает пищевую ценность и потребительские свойства хлеба, увеличивает срок годности готовой продукции. Закваска является промежуточным продуктом для приготовления теста и хлеба, содержит активные молочнокислые бактерии и представляет собой смесь муки и воды [1-3]. Снижение *pH* среды, отмечающееся в результате молочнокислого брожения, приводит к ингибированию амилаз муки, активации фитазы злаковых культур, растворению пентозанов ржи в тесте [4-7]. Важнейшими свойствами молочнокислых бактерий, помимо их кислотообразующей активности, являются протеолитическая активность, образование летучих ароматических соединений и их предшественников, продуцирование экзополисахаридов, а также образование бактерицидных и фунгицидных соединений.

Микробиологический состав закваски зависит от многих факторов, прежде всего от химического состава муки, окислительно-восстановительного потенциала теста, температуры и времени ферментации. На практике сильное влияние оказывают такие параметры процесса как активность воды, количество и состав заквасочных микроорганизмов, концентрация соли, количество этапов размножения и продолжительность ферментации. Под воздействием указанных параметров во время непрерывного размножения закваски происходит отбор характерной кислотоустойчивой микрофлоры молочнокислых бактерий и дрожжей и подавление роста посторонних микроорганизмов, присутствующих в исходном сырье [6-8].

Микробиологические исследования показали, что в хлебопекарных заквасках спонтанного брожения встречаются многие виды, преимущественно из рода *Lactobacillus* [5], и несколько видов дрожжей, в основном родов *Saccharomyces* и *Candida* [4,5], а также *Leuconostoc, Weissella, Pediococcus* и *Enterococcus* [5-7]. Наиболее распространенными видами бактерий рода *Lactobacillus*, встречающихся в заквасках, являются *L. sanfranciscensis* [8], *L. plantarum, L. brevis, L. fermentum, L. rossiae, L. reuteri, L. pontis, L. alimentarius, L. amylovorus, L. delbrueckii* [5,8].

Антагонистическое действие бактерий является важнейшей характеристикой при отборе штаммов для промышленного применения их в качестве заквасочных культур в пищевых технологиях [9-13]. Известно, что антимикробная активность молочнокислых микроорганизмов является индивидуальной характеристикой штамма [14-18]. В связи с этим, изучение способности молочнокислых бактерий подавлять рост посторонней микрофлоры является актуальной задачей при разработке новых заквасок для хлебопекарной промышленности.

Цель настоящей работы – оценка антагонистической способности перспективных штаммов молочнокислых бактерий для хлебопекарной промышленности.

**Методология**. Объектами исследования явились новые функционально-активные штаммы *p. Lactobacillus*, хранящиеся в музее кафедры технологии пищевых производств ФГБОУ ВО «КНИТУ»: *L. plantarum 24, L. fermentum 10, L. fermentum 12, L. fermentum 13, L. casei 16, L. casei 23, L. casei 32, L. casei 36, L. casei ТМБ-Д, L. bavaricus 6, L. acidophilus 9* [19, 20], а также штаммы из Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов: *L. casei МДП-1, L. plantarum 71 L. plantarum 131.*

Антагонистическую активность штаммов оценивали общепринятым методом диффузии в агар с измерением зоны ингибирования тест-культуры в мм [9,16], а также по степени подавления их роста заквасками при совместном культивировании в модельной среде из ржаной муки в течение 48 ч при температуре 37°С. В качестве тест-организмов использовали штаммы бактерий – *Staphylococcus aureus, Escherichia coli, Proteus vulgaris, Pseudomonas aeruginosa, Bacillus*

*subtilis* и микроскопических грибов – *Penicillium chrysogenum, Aspergillus niger, Candida guilliermondii, Fusarium oxysporum.*

Для культивирования молочнокислых бактерий применяли жидкую и агаризованную (2%) питательную среду *MRS* следующего состава: глюкоза – 20 г, мясной экстракт – 8 г, дрожжевой экстракт – 4 г, цитрат аммония – 2 г, сульфат магния – 0,2 г, бактериологический пептон – 10 г, ацетат натрия – 5 г, гидрофосфат калия – 2 г, твин 80 – 1 г, сульфат марганца – 0,05 г, сульфат магния – 0,02 г, вода – 1 л, конечная величина pH 6,2 ± 0,2.

Для культивирования тест-штаммов бактерий применяли мясо-пептонный бульон и мясо-пептонный агар, тест-штаммов микроскопических грибов – среду Сабуро согласно ГОСТ 10444.12.

В хлебопекарной продукции определяли значения КМАФАнМ по ГОСТ 10444.15, количество плесневых грибов и дрожжевых клеток согласно ГОСТ 10444.12.

Полученные результаты обработаны статистически при помощи программы *Microsoft Excel.* Данные представляют средние арифметические значения трех повторностей эксперимента и их среднеквадратичное отклонение.

Достоверность различий между группами данных определяли с помощью *t*-критерия Стьюдента ($p \leq 0,05$).

**Результаты.** На первом этапе исследований была изучена антагонистическая активность исследуемых штаммов молочнокислых бактерий методом отстроченного антагонизма диффузией в агаризованную среду *MRS* продуктов метаболизма лактобацилл. Результаты изучения спектров антибактериальной и фунгицидной активности исследуемых штаммов представлены в таблицах 1 и 2 соответственно.

*Таблица 1 – Антибактериальная активность штаммов*

| Штамм | Зона ингибирования, мм | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | *Proteus vulgaris* | *Staphylococcus aureus* | *Escherichia coli* | *Pseudomonas aeruginosa* | *Bacillus subtilis* |
| *L. plantarum 24* | 4±1 | 8±1 | 22±1 | 3±1 | 24±2 |
| *L. plantarum 71* | 3±1 | 6±2 | 14±2 | 0 | 16±1 |
| *L. plantarum 131* | 5±1 | 2±2 | 15±2 | 0 | 19±2 |
| *L. fermentum 10* | 2±1 | 14±1 | 28±2 | 2±1 | 21±1 |
| *L. fermentum 12* | 2±1 | 4±1 | 22±2 | 4±1 | 19±1 |
| *L. fermentum 13* | 6±1 | 10±1 | 20±2 | 2±1 | 20±3 |
| *L. casei 16* | 9±1 | 12±1 | 20±2 | 0 | 18±2 |
| *L. casei 23* | 10±1 | 10±1 | 22±2 | 0 | 18±1 |
| *L. casei 32* | 10±1 | 12±1 | 27±2 | 8±1 | 25±2 |
| *L. casei 36* | 6±1 | 4±1 | 18±1 | 4±1 | 23±2 |
| *L. casei ТМБ-Д* | 7±1 | 3±1 | 14±1 | 0 | 15±1 |
| *L. casei МДП-1* | 9±1 | 10±1 | 19±2 | 2±1 | 22±2 |
| *L. bavaricus 6* | 8±1 | 18±1 | 30±3 | 3±1 | 11±1 |
| *L. acidophilus 9* | 8±1 | 0 | 16±1 | 0 | 18±2 |

*Таблица 2 – Фунгицидная активность штаммов*

| Штамм | Зона ингибирования, мм | | | |
|---|---|---|---|---|
| | *Aspergillus niger* | *Penicillium chrysogenum* | *Fusarium oxysporum* | *Candida guilliermondii* |
| *L. plantarum 24* | 8±1 | 10±1 | 8±1 | 10±1 |
| *L. plantarum 71* | 2±1 | 2±1 | 0±1 | 0±1 |
| *L. plantarum 131* | 6±1 | 6±1 | 4±1 | 2±1 |
| *L. fermentum 10* | 12±1 | 15±1 | 16±1 | 10±1 |
| *L. fermentum 12* | 0 | 0 | 0 | 0 |
| *L. fermentum 13* | 0 | 0 | 0 | 0 |
| *L. casei 16* | 6±1 | 0 | 8±1 | 0 |
| *L. casei 23* | 0 | 0 | 0 | 0 |
| *L. casei 32* | 14±1 | 12±1 | 10±1 | 17±1 |
| *L. casei 36* | 10±1 | 11±1 | 10±1 | 14±1 |
| *L. casei ТМБ-Д* | 2±1 | 0 | 2±1 | 0 |
| *L. casei МДП-1* | 6±1 | 6±1 | 10±1 | 7±1 |
| *L. bavaricus 6* | 6±1 | 0±1 | 6±1 | 11±1 |
| *L. acidophilus 9* | 0 | 0 | 0 | 0 |

Далее была изучена антагонистическая активность штаммов молочнокислых бактерий, продемонстриро-вавших высокую ингибирующую способность в предыдущем тесте – *L. casei 32, L. casei 36, L. fermentum 10* и *L. plantarum 24* при культивировании тест-культур в модельной среде из ржаной муки.

Результаты проведенных исследований предс-тавлены на рисунке 1.

На заключительном этапе работы была проведена серия лабораторных выпечек ржано-пшеничного хлеба по рецептуре хлеба «Дарницкий» (ГОСТ 26983-2015) на густой ржаной закваске с примене-нием исследуемых лактобацилл (опытные образцы) и промышленного препарата лактобактерина (контроль). Лактобактерин для хлебных заквасок представляет собой лиофилизированную биомассу лактобацилл *Lactobacillus plantarum 63, L. brevis 5* и *L. brevis 78.*

Результаты изучения изменения микробио-логических показателей хлебобулочных изделий при хранении представлены в таблице 3.

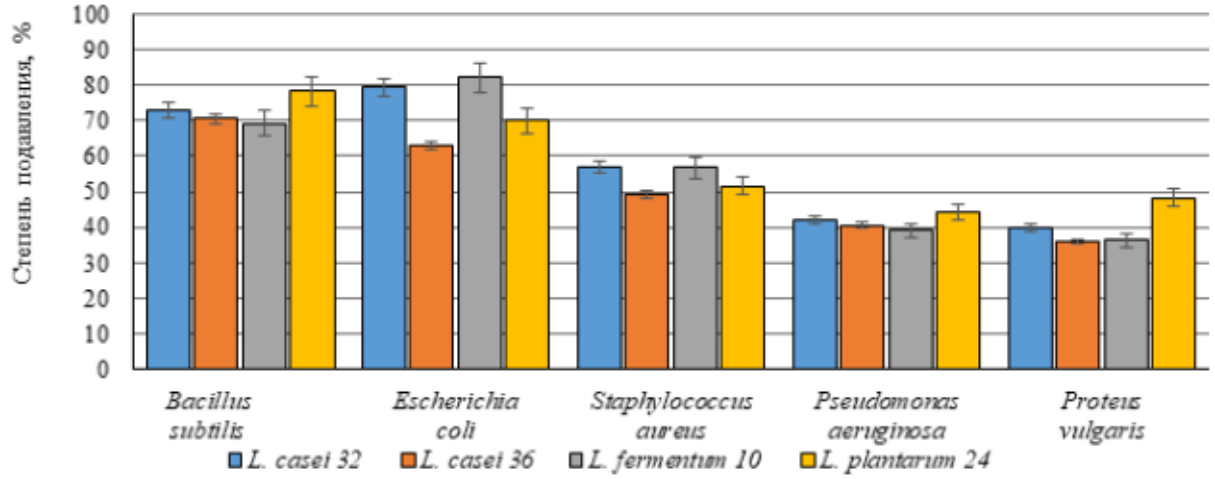



*Рисунок 1 – Ингибирование тест-культур в модельной среде*

*Таблица 3 –Микробиологические показатели ржано-пшеничного хлеба*

| Микробиологические показатели | Контроль | Заквасочные культуры | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | *L. fermentum 10* | *L. casei 32* | *L. plantarum 24* | *L. casei 36* |
| КМАФАнМ, КОЕ/г | (29±5)×10³ | (21±3)×10² | (64±5)×10 | (83±6)×10 | (28±4)×10² |
| Дрожжи, КОЕ/г | менее 10 | - | - | - | менее 10 |
| Плесневые грибы, КОЕ/г | менее 10 | менее 10 | - | - | менее 10 |

*Таблица 4 – Признаки появления плесневения на исследуемых образцах хлеба*

| Заквасочная микрофлора | Время, ч | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | 24 | 48 | 72 | 98 | 120 | 144 | 168 |
| *L. fermentum 10* | - | - | - | - | - | ± | + | + |
| *L. casei 32* | - | - | - | - | - | - | + | + |
| *L. plantarum 24* | - | - | - | - | - | - | ± | + |
| *L. casei 36* | - | - | - | - | - | ± | + | + |
| Контроль | - | - | - | ± | + | + | + | + |

*Примечание: «+» интенсивный запах, появление колоний грибов; «-» отсутствие признаков плесневения хлеба; «±» наличие запаха плесневения, отсутствие колоний.*

**Обсуждение.** Бактерии рода *Lactobacillus* играют ключевую роль в ферментации углеводов при про-изводстве хлебобулочных изделий. В научно-техни-ческой литературе широко обсуждаются механизмы проявления антимикробных свойств бактерий рода *Lactobacillus* [13-19], тогда как работ по оценке и ана-лизу антагонистической активности рода *Lactococcus* существенно меньше.

Ингибирующая активность молочнокислых бак-терий специалисты связывают со способностью данной группы синтезировать метаболиты, проявля-ющие бактерицидные и фунгицидные свойства, на-пример, перекись водорода, лизоцим, органические кислоты, диацетил, окись азота, реутерин, бактери-оцины [16, 18].

В настоящее время уделяется большое внимание бактериостатической активности органических кис-лот, продуцируемых *Lactobacillus*, как важнейшей биотехнологической характеристике. Гетероферм-ентативные виды образуют уксусную, янтарную и

пирролидон-5-карбоновую кислоты, эти продукты метаболизма молочнокислых бактерий при снижении pH среды подавляют рост других микроорганизмов. Помимо неспецифического закисления среды, некоторые виды *Lactobacillus* продуцируют ряд термостабильных бактериоцинов с широким спектром мишеней их антимикробного действия: *L. plantarum* – лактолин, *S. lactis* – низин, *S. cremoris* – диплококцин, *L. brevis* – бревин, *L. acidophilus* – ацидофилин и лактоцидин и др. [14, 16]. Данные метаболиты действуют как биоконсерванты и играют ведущую роль в подавлении роста вредных микроорганизмов, обеспечивают безопасность и длительный срок хранения различных продуктов питания. В настоящее время накоплено достаточно много данных об успешном применении бактериоционов молочнокислых микроорганизмов в качестве биоконсервантов в технологии ферментированных молочных, мясных, рыбных продуктов, квашенных овощей и фруктов [9-11, 14, 21].

Как показывают результаты исследований, все представленные штаммы лактобацилл обладают высокой антогонистической активностью по отношению к *B. subtilis* и *E. coli,* диаметр зоны подавления развития микроорганизмов составляет 11-26 мм и 15-30 мм соответственно. Выявлено, что штаммы *L. bavaricus 6, L. fermentum 10* и *L. casei 32* проявляют максимальную антагонистическую активность к *E. coli* (зона подавления роста микроорганизмов составляет 26-30 мм), по отношению к *B. subtilis* максимальная активность выявлена у лактобацилл *L. plantarum 24, L. casei 36, L. casei 32* (диаметр зоны лизиса 23-26 мм).

Исследуемые штаммы практически не проявляют антагонистическую активность в отношении *Ps. aeruginosa*, за исключением *L. casei 32*. Все изучаемые лактобациллы подавляют жизнедеятельность *Pr. vulgaris,* при этом у штаммов *L. casei 32* и *L. casei 23* наблюдается максимальный ингибирующий эффект (диаметр зоны задержки роста составляет 10 мм). Установлено, что штаммы *L. bavaricus 3, L. casei 16, L. fermentum 10* и *L. casei 23* подавляют рост и развитие *Staph. aureus,* диаметр зоны ингибирования составляет 12-18 мм.

Установлено, что максимальную фунгицидную активность проявляют *L. fermentum 10, L. casei 36, L. plantarum 24* и *L. casei 32*, так, зона подавления роста тест-культуры *Aspergillus niger* составляет 8-16 мм, *Fusarium oxysporum* – 8-15 мм, *Candida guilliermondii* – 10-17 мм, *Penicillium chrysogenum* – 10-15 мм.

В результате анализа данных антагонистической активности *L. fermentum 10, L. casei 32, L. plantarum 24* и *L. casei 36* по степени подавления роста тест-культур в модельной среде из ржаной муки и воды установлено, что все штаммы способны существенно подавлять рост и развитие *B. subtilis* и *E. coli* в мучной среде, через 48 ч эксперимента степень подавления развития тест-культуры *B. subtilis* составляет 69-78 %, *E. coli* 63-82 %, *Stap. aureus* 49-56,5 %, *Ps. aeruginosa* 39-44 %, *Pr. vulgaris* 36-48 % (рис. 1).

Результаты исследования микробиологической обсемененности ржано-пшеничного хлеба подтверждают высокую ингибирующую активность исследуемых штаммов против санитарно-показательных микроорганизмов, в том числе плесневых грибов и дрожжей. В образцах ржано-пшеничного хлеба не обнаружены клетки *B. subtilis*, количество дрожжевых клеток и плесневых грибов и не превышало значений 10 КОЕ/г. Важно отметить, что через 72 ч хранения готовой продукции общая обсемененность контрольных образцов больше в 10 раз по сравнению с опытными образцами хлеба на заквасках.

В результате исследования хранимоспособности ржано-пшеничного хлеба на заквасках в летний период на присутствие в них плесневых грибов установлено, что на готовых изделиях признаки плесневения появились в опытных образцах с *L. fermentum 10* и *L. casei 36* – через 110-115 ч, с заквасками *L. plantarum 24* и *L. casei 32* – через 135-140 ч, тогда как в контрольных образцах через 72 ч хранения (табл. 4).

В ходе проведенных исследований выявлено, что применение заквасок лактобацилл с повышенными антагонистическими свойствами в технологии хлеба позволяет снизить обсемененность готовой хлебопекарной продукции, при этом наибольшей микробиологической чистотой обладают образцы ржано-пшеничного хлеба с использованием заквасок *L. plantarum 24* и *L. casei 32.*

**Выводы.** В результате оценки антагонистической активности заквасочных культур установлено, что *L. plantarum 24* и *L. casei 32* проявляют широкий спектр антибиотического действия, данные закваски подавляют рост грамположительных и грамотрицательных бактерий, мицелиальных грибов и дрожжей, вызывающих порчу продовольственного сырья и готовой продукции, в том числе хлебобулочных изделий.

Результаты проведенных исследований позволяют рекомендовать *L. casei 32* и *L. plantarum 24* в качестве заквасочных культур с повышенными антагонистическими свойствами для хлебопекарной промышленности.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Савкина, О.А. Классификация заквасок, применяемых в отечественном и зарубежном хлебопечении / О.А. Савкина, М.Н. Локачук, Л.И. Кузнецова, Е.Н. Павловская, О.И. Парахина, В.В. Мартиросян, М. Н. Костюченко // Хлебопечение России. 2022. – № 5. – С. 22-28.

2. Wu, S. Effect of sourdough fermented with corn oil and lactic acid bacteria on bread flavor / S. Wu, Y. Peng, J. Xi, Q. Zhao, D. Xu et al. // LWT. – 2022. – Vol. 155 (3). – P. 112935.

3. Алехина, Н. Н. Сравнительная оценка состава ароматобразующих веществ в заквасках и хлебе зерновом на их основе / Н.Н. Алехина, Е.И. Пономарева, Х.Ю. Боташева // Хлебопродукты. – 2022. – № 5. – С. 40-43.

4. Siepmann, F.B. Overview of sourdough technology: from production to marketing / F.B. Siepmann, V. Ripari, N. Waszczynskyj, M.R. Spier // Food Bioprocess. Technol. – 2018. – № 11. – P. 242-244.

5. De Vuyst, L. Microbial ecology and process technology of sourdough fermentation / L. De Vuyst, S. Van Kerrebroeck, F. Leroy // Adv. Appl. Microbiol. – 2017. – Vol. 100. – P. 49-160.

6. Minervini, F. Ecological parameters influencing microbial diver sity and stability of traditional sourdough / F. Minervini, M.

De Angelis, R. Di Cagno, M. Gobbetti, // Int. J. Food Microbiol. – 2014. – Vol. 171. – P. 136-146.

7. Ripari, V. Evolution of sourdough microbiota in spontaneous sourdoughs started with different plant materials / V. Ripari, M.G. Ga¨nzle, E. Berardi // Int. J. Food Microbiol. – 2016. – Vol. 232. – P. 35-42.

8. Ga¨nzle, M. Composition and function of sourdough microbiota: from ecological theory to bread quality / M. Ga¨nzle, V. Ripari // Int. J. Food Microbiol. – 2016. – Vol. 239. – P. 9-25.

9. Волкова, Г.С. Изучение производственных свойств отдельных штаммов молочнокислых бактерий для создания пробиотиков / Г.С. Волкова, Е.В. Куксова, Е.М. Серба // Пищевая промышленность. – 2020. – № 3. – С. 8-11.

10. Волкова, Г.С. Биотехнологические свойства закваски на основе консорциума промышленных штаммов молочнокислых бактерий / Г.С. Волкова, Е.М. Серба // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2020. – № 4(376). – С. 73-77.

11. Просеков, А.Ю. Инновационный менеджмент биотехнологий заквасочных культур / А.Ю. Просеков, Л.А. Остроумов // Техника и технология пищевых производств. – 2016. – Т. 43. – № 4. – С. 64-69.

12. Fedorova, T.V. Antagonistic activity of lactic acid bacteria *Lactobacillus spp.* in relation to clinical isolates of Klebsiella pneumoniae // Ap. Microbiology and Biotechnology. – 2018. – Vol. 54 (3). – P. 264-276.

13. Nionelli, L. Use of hop extract as antifungal ingredient for bread making and selection of autochthonous resistant starters for sourdough fermentation / L. Nionelli, E. Pontonio, M. Gobbetti, C.G. Rizzello // Int. J. Food Microbiol. – 2018. – Vol. 266. – P. 173-182.

14. Ouiddir, M. Selection of Algerian lactic acid bacteria for use as antifungal bioprotective cultures and application in dairy and bakery products / M. Ouiddir, G. Bettache, M. Leyva Salas, A. Pawtowski, C. Donot, S. Brahimi, et al. Food Microbiol. – 2019. – Vol. 82. – P. 160-170.

15. Russo, P. *Lactobacillus plantarum* with broad antifungal activity: a promising approach to increase safety and shelf–life of cereal–based products / P. Russo, M.P. Arena, D. Fiocco, V. Capozzi, D. Drider, G. Spano // Int. J. Food Microbiol. – 2017. – Vol. 247. – P. 48-54.

16. Atanasova, J. Proteolytic and antimicrobial activity of lactic acid bacteria grown in goat milk / J.Atanasova, P. Moncheva, I. Ivanova // Biotechnology & Biotechnological Equipment. – 2014. – Vol. 28. – Issue 6. – P. 1073-1078.

17. Karaseva, O.S. Antagonistic activity of newly isolated *Lactobacillus* strains against Morganella morganii / O.S. Karaseva, Yu.S. Yudina, Nikitina E.V., L.F. Minnullina, D.R. Yarullina //Opera Medica et Physiologica. – 2022. Vol. 9 (3). – P. 62-76.

18. Evdokimova, S.A. Antagonistic activity of synbiotics: response surface modeling of various factors / S.A. Evdokimova, B.A. Karetkin, M.O. Zhurikov, E.V. Guseva, N.V. Khabibulina, I.V. Shakir, V.I. Panfilov // Foods and Raw Materials. – 2022. – Vol. 10, №. 2. – P. 365-376.

19. Китаевская, С.В. Оценка протеолитической активности новых штаммов молочнокислых бактерий с криорезистентными свойствами / С.В. Китаевская, В.Я. Пономарев, О.А. Решетник // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. – 2022. – Т. 12. – № 1(40). – С. 76-86.

20. Kitaevskaya, S.V. Biotechnological potential of new strains of lactic acid bacteria / S.V. Kitaevskaya, V.Y. Ponomarev, A.F. Hasanova, N.K. Romanova // Overview of the II International Conference on Agribusiness, Environmental Engineering and Biotechnologies – AGRITECH – II – 2019 // IOP Conference Series: Earth and Environmenatl Science. – 2020. – Vol. 421(1). – № Art. 052018.

21. Стоянова, Л.Г. Метабиотические свойства штаммов *Lactobacillus acidophilus*, входящих в комплексные закваски для производства пробиотических молочных продуктов / Л.Г. Стоянова, С.Д. Дбар, И.С. Полянская // Биотехнология. – 2022. – Т. 38. – № 1. – С. 3-12.

*Статья поступила в редакцию 02.10.2024*
*Статья принята к публикации 13.12.2024*

УДК 633.85
EDN: KFFOLK

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛЕЦИТИНА ПОДСОЛНЕЧНОГО НА КАЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ХЛЕБНОГО ПРОДУКТА

© Автор(ы) 2024

SPIN: 6181-2038
AuthorID: 1260992
ORCID: 0009-0001-5442-4808
**ПОРОШИНА Дарья Денисовна,** старший лаборант кафедры биотехнологии и инжиниринга
*Уральский государственный экономический университет*
*(620144, Россия, Екатеринбург, улица 8 Марта/Народной Воли, 62/45, e-mail: poroshina.darya17@gmail.com)*
SPIN-код: 1642-6540
AuthorID: 812185
ORCID: 0000-0002-5018-4253
ResearcherID: ACV-3352-2022
ScopusID: 57222464004
**БРАШКО Иван Сергеевич**, старший преподаватель кафедры биотехнологии и инжиниринга
*Уральский государственный экономический университет*
*(620144, Россия, Екатеринбург, улица 8 Марта/Народной Воли, 62/45, e-mail: brashko_is@usue.ru)*
SPIN: 7537-3237
AuthorID: 14522827300
ORCID: 0000-0002-0470-7324
ResearcherID: JFJ-0378-2023
ScopusID: 14522827300
**ЛАЗАРЕВ Владимир Александрович,** кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой биотехнологии и инжиниринга
*Уральский государственный экономический университет*
*(620144, Россия, Екатеринбург, улица 8 Марта/Народной Воли, 62/45, e-mail: lazarev.eka@gmail.com)*
ORCID: 0009-0006-1880-7584
**ПАРТИНА Александра Антоновна**, студент кафедры биотехнологии и инжиниринга
*Уральский государственный экономический университет*
*(620144, Россия, Екатеринбург, улица 8 Марта/Народной Воли, 62/45, e-mail: chacapoy@yandex.ru)*

**Аннотация.** Статья посвящена исследованию влияния лецитина подсолнечного на свойства и качество хлебного продукта. Представлены различные исследования использования лецитина в технологии хлебопечения. В работе проведены исследования влияния внесения лецитина на органолептические, физико-химические показатели готового продукта. Разработаны рецептуры образцов с добавлением различной концентрации вносимой добавки. Были изготовлены 4 образца хлебного продукта: контрольный образец, без добавления лецитина; опытный образец 1, с добавлением 1,5% лецитина к массе муки; опытный образец 2, с добавлением 3% лецитина к массе муки; опытный образец 3, с добавлением 4,5% лецитина к массе муки. На первом этапе выявлено, что опытные образцы с добавлением лецитина имеют большие габариты и массу в сравнении с контрольным образцом. На втором этапе были проведены органолептические исследования, которые продемонстрировали, что все образцы отвечают требованиям нормативного документа. На третьем этапе были проведены физико-химические исследования, в результате которых было выявлено, что добавление 1,5% и 3% лецитина подсолнечного к массе муки благоприятнее всего сказываются на качественных характеристиках готового продукта. В связи с полученными данными, было выявлено, что для улучшения свойств, выхода готового продукта требуется вводить в рецептуру хлебного продукта 3% лецитина подсолнечного по отношению к массе муки.

**Ключевые слова:** лецитин подсолнечный, нормативные показатели, хлебный продукт, показатели качества, технология хлеба.

# INVESTIGATION OF THE EFFECT OF SUNFLOWER LECITHIN ON THE QUALITATIVE CHARACTERISTICS OF A BREAD PRODUCT

© The Author(s) 2024

**POROSHINA Darya Denisovna,** senior laboratory assistant at the Department of Biotechnology and Engineering
*Ural State University of Economics*
*(Russia, 620144, Yekaterinburg, 8 Marta/Narodnoy Voli St., 62/45, e-mail: poroshina.darya17@gmail.com)*
**BRASKO Ivan Sergeevich**, senior lecturer at the Department of Biotechnology and Engineering
*Ural State University of Economics*
*(Russia, 620144, Yekaterinburg, 8 Marta/Narodnoy Voli St., 62/45, e-mail:brashko_is@usue.ru)*

**LAZAREV Vladimir Alexandrovich** candidate of technical sciences, associate professor,
head of the Department of Biotechnology and Engineering
*Ural State University of Economics*
*(Russia, 620144, Yekaterinburg, 8 Marta/Narodnoy Voli St., 62/45, e-mail: lazarev.eka@gmail.com)*
**PARTINA Alexandra Antonovna**, student of the Department of Biotechnology and Engineering
*Ural State University of Economics*
*(Russia, 620144, Yekaterinburg, 8 Marta/Narodnoy Voli St., 62/45, e-mail: chacapoy@yandex.ru)*

**Abstract.** The article is devoted to the study of the effect of sunflower lecithin on the properties and qualities of a bread product. Various studies on the use of lecithin in baking are presented. The work investigates the effect of lecithin application on the organoleptic, physico-chemical parameters of the finished product. Formulations of samples with the addition of various concentrations of the applied additive have been developed. 4 samples of the bread product were made: a control sample, without the addition of lecithin; prototype 1, with the addition of 1.5% lecithin to the mass of flour; prototype 2, with the addition of 3% lecithin to the mass of flour; prototype 3, with the addition of 4.5% lecithin to the mass of flour. At the first stage, it was revealed that the prototypes with the addition of lecithin have large dimensions and weight in comparison with the control sample. At the second stage, organoleptic studies were conducted, which demonstrated that all samples meet the requirements of the regulatory document. At the third stage, physico-chemical studies were carried out, as a result of which it was revealed that the addition of 1.5% and 3% sunflower lecithin to the mass of flour has the most favorable effect on the quality characteristics of the finished product. In connection with the data obtained, it was revealed that in order to improve the properties and yield of the finished product, 3% sunflower lecithin relative to the mass of flour must be introduced into the formulation of the bread product.

**Keywords:** sunflower lecithin, normative indicators, bread product, quality indicators, bread technology.

*Для цитирования: Порошина Д.Д. Исследование влияния лецитина подсолнечного на качественные характеристики хлебного продукта / Д.Д. Порошина, И.С. Брашко, В.А. Лазарев, А.А. Партина // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 4(68). – С. 136-141. – EDN: KFFOLK.*

**Введение.** Современный мир ставит перед человечеством ряд проблем, самой актуальной выступает здоровьесбережение населения. Здоровьесбережение это комплекс мер, направленных на сохранение, укрепление и формирование здоровья населения.

Обеспокоенность и поиск решений мировым сообществом выражены в разработке Программы «Десятилетие действий ООН по проблемам питания, 2016 – 2025 годы», Доктрине обеспечения продовольственной безопасности России до 2030 г. и Стратегии повышения качества пищевой продукции в Российской Федерации до 2030 г.

По данным статистического издания «Регионы России. Социально-экономические показатели» в 2022 году россиянами потреблено в среднем по регионам 113 кг хлеба на душу населения и входит в пятерку самых потребляемых продуктов российскими семьями [1].

Важными параметрами при производстве хлеба влияющими на конкурентоспособность производства являются высокая пищевая ценность и функциональная ценность при сохранении традиционных и узнаваемых потребителем органолептических показателей качества, а также низкая себестоимость изделия [2, 3].

В связи с этими факторами исследование технологии обогащения хлеба физиологически ценными ингредиентами из доступного сырья, не приводящего к значительному удорожанию продукции и обеспечит здоровьесбережение населения является актуальным [4].

Вторичные ресурсы переработки сырья являются важным компонентом, содержащим ценные макро- и микронутриенты, в частности лецитины [5].

Для обогащения хлеба применяются лецитины, полученные из яичного желтка, растительных масел из сои, подсолнечника, рапса [6].

Из данных, полученных в исследовании [7], следует, что мука, обогащенная токоферолами, каротиноидами и лецитином имеет улучшенные антиоксидантные свойства в сравнении с аналогами. Еще одно подтверждение положительного синергетического эффекта лецитина с льняным маслом и глицерином описано в работе [8] и доказано, что такая комбинация позволяет улучшить качество сдобного булочного изделия с соевым изолятом.

Практика хлебопечения показала, что добавление лецитина в тесто не только улучшает качество выпечки, но и помогает дольше сохранять свежесть хлеба [9].

Авторами [10] исследовано применение соевого лецитина в технологии зернового хлеба и проведены комплексные исследования рациональные дозировки лецитина (0,5–1,0 % к массе зерна). Полученные данные свидетельствуют о том, что такая дозировка улучшает качество хлеба и способствует более длительному сохранению свежести [11, 12].

Авторами получен патент [13] на метод производства булочных изделий с использованием соевого лецитина. Данная технология способствует улучшению органолептических и физико-химических свойств готовой продукции, сокращает время технологического процесса, увеличивает срок свежести и повышает пищевую ценность булочных изделий [14].

Авторами [15] был получен лецитин из яичного желтка методом экстракции. В ходе работы было определено количество входящих в его состав фосфолипидов. Фосфолипиды – это пищевые эмульгаторы, играющие важную роль в транспорте липидов и метаболизме. Благодаря содержанию в своем составе фосфолипидов лецитин способен стабилизировать жировую эмульсию как на поверхности продуктов, так и внутри продукта, влияя на текстуру и вкусовые качества [16, 17].

В работе [18] показано, что добавление подсолнечных лецитинов олеинового типа в муку в количестве 5-6% от её массы обеспечивает улучшенные структурно-механические свойства теста. Время брожения теста сократилось на 25-35 минут по сравнению с контрольным образцом, что связано с высокими поверхностно-активными свойствами лецитинов, их способностью удерживать влагу и выраженной поверхностной активностью [19].

Несмотря на то, что в практике хлебопечения применяются лецитины, авторами установлено, что есть технологические особенности, влияющие на ценообразование и качество конечного продукта.

Нами была оценена экономическая целесообразность применения того или иного вида лецитина. Так, цена за 1 килограмм подсолнечного лецитина составила 100 рублей, цена за килограмм соевого лецитина составляет 300 рублей, цена за килограмм рапсового лецитина составляет 120 рублей. Цена за килограмм яичного желтка составляет 400 рублей, не считая трудоемкого процесса экстракции из них лецитина, что скажется на увеличении времени производственного процесса. Таким образом для исследования был выбран наиболее экономически выгодный вид лецитина – подсолнечный.

Исследуемый в данной работе лецитин жидкий подсолнечный Е322(I) «*LECIPRIME SF RU*» производства ООО «Каргилл» Тульская область, город Ефремов раннее не применялся, апробация в технологии хлеба была произведена впервые.

**Методология.** В связи с вышеизложенными данными, целью работы является изучение влияния лецитина подсолнечного на свойства и качество хлебного продукта, определение оптимальной дозировки внесения лецитина, без ущерба для органолептических и физико-химических характеристик.

Объекты исследования: пищевая добавка лецитин жидкий подсолнечный Е322(I) «*LECIPRIME SF RU*»; образцы готовых изделий, выпеченных в лабораторных условиях, за основу была взята рецептура «хлеба из пшеничной муки первого сорта», из сборника рецептур на хлеб и хлебобулочные изделия [20].

Пористость хлебного продукта определялась по ГОСТ «5669-96 Хлебобулочные изделия. Метод определения пористости» методом взвешивания цилиндрической выемки.

Влажность хлебного продукта определялась по ГОСТ 21094-2022 «Изделия хлебобулочные. Методы определения влажности» гравиметрическим методом путем высушивания пробы изделия в сушильном шкафу. Метод основан на испарении влаги из навески в сушильном шкафу при температуре 130°С в течение определенного времени. После высушивания определяют массовую долю влаги по отношению разности масс навески до и после высушивания к массе навески до высушивания.

Кислотность хлебного продукта определялась по ГОСТ 5670-96 «Хлебобулочные изделия. Методы определения кислотности» арбитражным методом.

Сравнение образцов хлебного продукта по органолептическим и физико-химическим показателям проводились в соответствии с ГОСТ 26987-86 «Хлеб белый из пшеничной муки высшего, первого и второго сортов. Технические условия».

**Результаты.** Нами были разработаны рецептуры хлебного продукта с добавлением подсолнечного лецитина. Рецептура для контрольного и трех опытных образцов с внесением 1,5%, 3% и 4,5% к массе муки представлены в таблице 1.

Нами были изготовлены и исследованы образцы хлебного продукта. Фотография готовых хлебных продуктов представлена на рисунке 1 (слева направо: контрольный образец, без добавления лецитина; опытный образец 1, с добавлением 1,5% лецитина к массе муки; опытный образец 2, с добавлением 3% лецитина к массе муки; опытный образец 3, с добавлением 4,5% лецитина к массе муки).

На первом этапе исследований нами были определены объем выхода и масса готового хлебного продукта, изготовленного по приведенным выше рецептурам безопарным способом.

Контрольный образец: объем – 630 см$^3$, масса – 171,51 г. Опытный образец 1: объем – 693 см$^3$, масса – 173,35 г. Опытный образец 2: объем – 845,25 см$^3$, масса – 202,05 г. Опытный образец 3: объем – 684,25 см$^3$, масса – 188,61 г.

Из полученных данных следует, что добавление лецитина благоприятно влияет на объемный выход хлеба, так у опытного образца 1 объем выхода больше на 10% в сравнении с контрольным, объем выхода опытного образца 2 выше значения контрольного образца на 34,2%, объем выхода опытного образца 3 выше показателя объема контрольного образца на 8,6%.

Полученные данные на первом этапе свидетельствуют о увеличении выхода в зависимости от дозировки лецитина. Наиболее значимые результаты достигнуты при добавлении 3% лецитина к массе муки.

На втором этапе исследований нами были оценены органолептические показатели хлебного продукта по ГОСТ 26987-86 «Хлеб белый из пшеничной муки высшего, первого и второго сортов. Технические условия».

Результаты представлены в таблице 2.

*Таблица 1 – Рецептуры контрольного и опытных образцов хлебного продукта*

| Образец | Ингредиент | Масса, г |
|---|---|---|
| Контрольный образец | Мука | 150 г |
| | Дрожжи | 2,25 г |
| | Соль | 1,95 г |
| | Вода | 98,8 г |
| Опытный образец 1 | Мука | 147,75 г |
| | Дрожжи | 2,25 г |
| | Соль | 1,95 г |
| | Вода | 98,8 г |
| | Лецитин | 2,25 г |
| Опытный образец 2 | Мука | 145,5 г |
| | Дрожжи | 2,25 г |
| | Соль | 1,95 г |
| | Вода | 98,8 г |
| | Лецитин | 4,5 г |
| Опытный образец 3 | Мука | 143,25 |
| | Дрожжи | 2,25 г |
| | Соль | 1,95 г |
| | Вода | 98,8 г |
| | Лецитин | 6,75 г |



*Рисунок 1 – Готовые образцы хлебного продукта*

*Таблица 2 – Органолептические исследования контрольного и опытных образцов хлебного продукта*

| Показатель | Образец | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Контрольный образец | Опытный образец 1 | Опытный образец 2 | Опытный образец 3 |
| Внешний вид: |  |  |  |  |
| Форма | Соответствует форме, в которой производилась выпечка, без боковых выплывов | | | |
| Поверхность | Гладкая, без крупных трещин и подрывов | | | |
| Цвет | Светло-коричневый | | | Коричневый |
| Состояние мякиша: | | | | |
| Пропеченность | Пропеченный, не влажный на ощупь. Эластичный. После легкого надавливания мякиш принимает первоначальную форму | | | |
| Промес | Без комочков и следов непромеса | | | |
| Пористость | Развитая, без пустот и уплотнений | | | |
| Вкус | Свойственный данному виду изделия, без постороннего привкуса | | | |
| Запах | Свойственный данному виду изделия, без постороннего запаха | | | |

Из данных таблицы органолептических исследований следует, что все образцы соответствуют нормативным показателям. Визуально наблюдается отличие у образца 3 цвет поверхности изделия более темного цвета в отличии от контрольного образца и 1, 2 опытных образцов. Цвет мякиша опытных образцов контрастно отличался от контрольного образца, у которого цвет был серым. В зависимости от используемой дозировки лецитина в сторону увеличения наблюдалось изменение цвета мякиша к более белому цвету.

На третьем этапе исследований нами были оценены физико-химические показатели хлебного продукта по ГОСТ 26987-86 «Хлеб белый из пшеничной муки высшего, первого и второго сортов. Технические условия».

Результаты представлены в таблице 3.

Из данных таблицы физико-химических исследований (табл. 3) следует, что все образцы имеют хорошие показатели по физико-химическим исследованиям. Статистическое различие не выходит за пределы погрешности измерений.

*Таблица 3 – Физико-химические исследования контрольного и опытных образцов хлебного продукта*

| Показатель | Норма по ГОСТ | Образец | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Контрольный образец | Опытный образец 1 | Опытный образец 2 | Опытный образец 3 |
| Влажность мякиша, % | Не более 44,0% | 41,51% | 40,5% | 40,0% | 44,2% |
| Кислотность мякиша, град | Не более 3,0 град | 2,0 град | 2,2 град | 2,8 град | 2,4 град |
| Пористость мякиша, % | Не менее 74,0% | 76,2% | 75,0% | 76,5% | 75,7% |

**Обсуждение.** Лецитин успешно используется в хлебопечении. Он помогает получить изделия с более приятным вкусом и лучшими органолептическими характеристиками. Добавление лецитина в тесто делает мякиш хлебного продукта мягким и воздушным, укрепляя клейковину, делая тесто более пластичным.

В ходе лабораторных исследований были изготовлены образцы хлебного продукта: контрольный образец, без добавления лецитина и три опытных образца, с добавлением 1,5%, 3% и 4,5% лецитина соответственно.

В результате физико-химических исследований было выявлено, что введение в рецептуру хлебного продукта лецитина не влияет на качественные характеристики.

При обогащении продукта 1,5% и 3% подсолнечного лецитина достигнуты наилучшие результаты по органолептическим показателям выхода готового продукта.

Подсолнечный лецитин вводится в тесто одновременно с другими ингредиентами, не нарушая последовательности производства. Это делает процесс обогащения хлебного продукта лецитином простым и не требует значительных изменений в технологической операции.

**Выводы.** В данном исследовании оценена возможность применения подсолнечного лецитина исходя из экономических показателей и запроса реального сектора экономики в сравнении с другими видами лецитина. Проведены контрольные замеры и завесы образцов, оценены органолептические и физико-химические показатели.

В результате выявлено, что оптимальной дозировкой внесения лецитина к массе муки является – 3%, о чем свидетельствуют высокие показатели выхода готового изделия, объем – 845,25 см$^3$, масса – 202,05 г, полное соответствие требованиям по органолептическим показателям и по физико-химическим показателям превышающие показатели контрольного образца.

В дальнейших исследованиях авторским коллективом будет изучена антиоксидантная активность хлебных продуктов с добавлением лецитина, оценено содержание макро- и микронутриентов готовых изделий.

**Благодарности.**

Авторский коллектив выражает благодарность заведующему лабораторией биотехнологии Единого лабораторного комплекса ФГБОУ ВО «Уральский государственный экономический университет» Гуловой Т.И. и инженеру лаборатории биотехнологии Единого лабораторного комплекса ФГБОУ ВО «Уральский государственный экономический университет» Орловой Е.Н. за содействие в проведении исследований.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Зимняков, В.М. Состояние производства хлеба и хлебобулочных изделий в России / В.М. Зимняков // Инновационная техника и технология. – 2022. – Т. 9, № 4. – С. 87-92. – EDN FKUFKS.

2. Amoah I, Cairncross C, Osei EO, Yeboah JA, Cobbinah JC, Rush E. Bioactive Properties of Bread Formulated with Plant-based Functional Ingredients Before Consumption and Possible Links with Health Outcomes After Consumption- A Review. Plant Foods Hum Nutr. 2022 Sep;77(3):329-339. doi: 10.1007/s11130-022-00993-0. Epub 2022 Jul 20. PMID: 35857200; PMCID: PMC9463282.

3. Mesta-Corral M, Gómez-García R, Balagurusamy N, Torres-León C, Hernández-Almanza AY. Technological and Nutritional Aspects of Bread Production: An Overview of Current Status and Future Challenges. Foods. 2024 Jun 28;13(13):2062. doi: 10.3390/foods13132062. PMID: 38998567; PMCID: PMC11241233.

4. Wang Y, Jian C. Sustainable plant-based ingredients as wheat flour substitutes in bread making. NPJ Sci Food. 2022 Oct 28;6(1):49. doi: 10.1038/s41538-022-00163-1. PMID: 36307422; PMCID: PMC9614748.

5. Корнен, Н.Н. Применение растительных фосфолипидов (лецитинов) в производстве хлебобулочных изде-

лий / Н.Н. Корнен, Т.В. Першакова, Е.В. Лисовая // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2016. – № 116. – С. 288-300. – EDN VQUVND.

6. EFSA Panel on Food Additives and Nutrient Sources added to Food (ANS); Mortensen A, Aguilar F, Crebelli R, Di Domenico A, Frutos MJ, Galtier P, Gott D, Gundert-Remy U, Lambré C, Leblanc JC, Lindtner O, Moldeus P, Mosesso P, Oskarsson A, Parent-Massin D, Stankovic I, Waalkens-Berendsen I, Woutersen RA, Wright M, Younes M, Brimer L, Altieri A, Christodoulidou A, Lodi F, Dusemund B. Re-evaluation of lecithins (E 322) as a food additive. EFSA J. 2017 Apr 7;15(4): e04742. doi: 10.2903/j.efsa.2017.4742. PMID: 32625454; PMCID: PMC7010002.

7. Зайцева, Л.В. Современные подходы к разработке рецептур безглютеновых хлебобулочных изделий / Л.В. Зайцева, Т.А. Юдина, Н.В. Рубан [и др.] // Вопросы питания. – 2020. – Т. 89, № 1. – С. 77-85. – DOI 10.24411/0042-8833-2020-10009. – EDN BIQFWS.

8. Пащенко Л.П., Ильина Т.Ф., Казакова Е.Ю., Сергиенко И.В. Новый вид сдобного изделия функциональной направленности // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2010. – № 7. – С. 51-54.

9. More P.R., Arya S.S. Lecithin-based micellar extraction of bioactive from pomegranate peel and its application in Indian flat bread (chapati) as a bioactive emulsifier //Food and Humanity. – 2024. – Т. 3. – С. 100346.

10. Хмелева, Е.В. Использование зерна полбы в технологии зернового хлеба повышенной пищевой ценности / Е.В. Хмелева // Индустрия питания. – 2023. – Т. 8, № 1. – С. 64-73. – DOI 10.29141/2500-1922-2023-8-1-7. – EDN KCGGFW.

11. Ahmed, I.B.H.; Hannachi, A.; Haros, C.M. Combined Effect of Chia Flour and Soy Lecithin Incorporation on Nutritional and Technological Quality of Fresh Bread and during Staling. Foods 2020, 9, 446.

12. Ren S, Du Y, Zhang J, Zhao K, Guo Z, Wang Z. Commercial Production of Highly Rehydrated Soy Protein Powder by the Treatment of Soy Lecithin Modification Combined with Alcalase Hydrolysis. Foods. 2024 Jun 7;13(12):1800. doi: 10.3390/foods13121800. PMID: 38928742; PMCID: PMC11203182.

13. Патент № 2740585 C1 Российская Федерация, МПК A21D 2/00, A21D 8/02. Способ производства булочного изделия из пшеничной муки первого сорта с гидролизованным соевым лецитином: № 2020112055: заявл. 25.03.2020: опубл. 15.01.2021 / Е.Б. Барабашов, Л.А. Ревина, Е.И. Пономарева [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный университет инженерных технологий" (ФГБОУ ВО "ВГУИТ"). – EDN MYDJUA.

14. Cao Y. et al. Effect of soy lecithin, glucose oxidase, and transglutaminase on dough rheology and quality properties of steamed bread enriched with potato pulp. – 2023.

15. Арчинова, Т.Ю. Изучение состава и анализ яичного лецитина химическими и физико-химическими методами / Т.Ю. Арчинова, Т.Ю. Манджиоладзе // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 2. – С. 442. – EDN RXUSQP.

16. Robert C, Couëdelo L, Vaysse C, Michalski MC. Vegetable lecithins: A review of their compositional diversity, impact on lipid metabolism and potential in cardiometabolic disease prevention. Biochimie. 2020 Feb; 169:121-132. doi: 10.1016/j.biochi.2019.11.017. Epub 2019 Nov 28. PMID: 31786232.

17. Колесниченко Светлана Леонтьевна Использование лецитина в лечебно-профилактическом питании // Архивариус. 2016. №6 (10). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-letsitina-v-lechebno-profilakticheskom-pitanii.

18. Илларионова, В.В. Исследование влияния лецитинов на хлебопекарные свойства пшеничной муки и качество хлеба / В.В. Илларионова, Т.В. Першакова, И.И. Погорелова, Р.С. Фукс // Новые технологии. – 2011. – № 4. – С. 28-33. – EDN OOOJQH.

19. Medvid I., Shydlovska O., Ishchenko T. Influence of the combination of emulsifiers on the properties of rice gluten-free dough and the quality of bread //Food and Environment Safety Journal. – 2021. – Т. 20. – №. 3.

20. Ершов П.С. Сборник рецептур на хлеб и хлебобулочные изделия, 2010. – 43 с.

*Статья поступила в редакцию 08.10.2024*
*Статья принята к публикации 13.12.2024*

***Статья публикуется при поддержке внутреннего гранта молодого ученого УрГЭУ № ТЗ-2.2023 от 21 сентября 2023 года.***

УДК 543.51: 577.1: 66.096.3
EDN: LCKNZX

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ *MALDI-MS* ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АЗАИНДОЛИЗИНОВ С ОБЪЕКТАМИ БЕЛКОВОЙ ПРИРОДЫ

©Автор(ы) 2024

SPIN: 1444-9757
AuthorID: 78711
ORCID: 0000-0002-5017-4678
**МИРГОРОДСКАЯ Ольга Александровна,** доктор химических наук,
старший научный сотрудник лаборатории системной вирусологии
*ФГБУ «НИИ гриппа им. А.А. Смородинцева» Минздрава России*
*(197376, Санкт-Петербург, ул. проф. Попова 15/1, e-mail: gorodmir_80@mail.ru)*
SPIN: 1373-3976
AuthorID: 56468
ORCID: 0000-0002-4217-483X
**КОЗЬМИН Юрий Петрович,** научный сотрудник лаборатории молекулярной биофизики
*Институт биоорганической химии им. академиков М.М.Шемякина и Ю.А.Овчинникова РАН*
*(Москва, 117997, ГСП-7, ул. Миклухо-Маклая, 16/10, e-mail: uriakozmin@yandex.ru)*
SPIN: 1585-4123
AuthorID: 603983
ORCID: 0009-0002-5528-5421
**БУБЛЯЕВ Ростислав Анатольевич,** кандидат физико-математических наук,
научный сотрудник лаборатории биомедицинской масс-спектрометрии
*Институт аналитического приборостроения РАН*
*(Санкт-Петербург, улица Ивана Черных, 31-33, e-mail: bub-slava@yandex.ru)*
SPIN: 1344-9397
AuthorID: 376408
ORCID: 0000-0002-8081-6688
ResearcherID: P-2675-2017
ScopusID: 57194266131
**МАЛЮТЕНКОВА Светлана Михайловна,** кандидат технических наук,
доцент Высшей школы сервиса и торговли
*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*
*(194064, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, e-mail: maluteshа66@mail.ru)*

**Аннотация**. В настоящей работе изучены некоторые свойства азолоазинов, которые содержат в своей структуре нитрогруппу. В их числе триазоверин (*TZV*), используемый в медицинской практике в качестве лекарственного препарата и ряд его синтетических аналогов. С учетом наличия нитрогруппы представлялось целесообразным оценить возможности ее взаимодействия с рядом объектов белковой природы. Целью настоящей работы явилось выявление побочных эффектов, которые может вызывать *TZV*, поскольку наличие в его структуре нитрогруппы может приводить к взаимодействию с рядом объектов белковой природы. Поэтому задачей данного исследования было изучение взаимодействия *TZV* и его специально синтезированных аналогов с функциональными пептидами человека. В качестве объектов воздействия (исследования) выбран ряд биологически активных пептидов (как нативных, так и их синтетических аналогов), а также один из функциональных белков сыворотки крови человека – ангиотензин. Наличие нитрогруппы у всех исследованных объектов позволило оценить их взаимодействие с рядом биологически активных пептидов и с ангиотензином. В настоящей работе на примере глутатиона (*GSH*), одного из важнейших биологически активных соединений, рассмотрено участие *TZV* в стимулировании процессов с образованием межмолекулярных дисульфидных связей, поскольку в биологических средах в достаточно высоких концентрациях присутствуют тиол-содержащие соединения. Полученные результаты указывают на широкий спектр участия *TZV* в различных процессах с участием тиол-содержащих продуктов. И эти процессы идут активнее для соединений с более высокими концентрациями, поскольку это бимолекулярные реакции, если только не имело место предварительное комплексообразование, которое превращает этот процесс во «внутримолекулярную» реакцию. Из полученных результатов можно сделать вывод о том, что триазоверин вызовет меньше побочных эффектов, чем другие его аналоги, исследованные в данной работе.

**Ключевые слова**: азолоазины, триазоверин, масс-спектрометрический метод *MALDI-MS*, азаиндолизины, белки сыворотки крови человека.

# USE OF *MALDI-MS* AND ELECTRON MICROSCOPY TO STUDY THE INTERACTION OF AZAINDOLYSINES WITH OBJECTS OF PROTEIN NATURE

©The Author(s) 2024

**MIRGORODSKAYA Olga Alexandrovna,** doctor of chemical sciences,

senior researcher Laboratory of Systems Virology
*Federal State Budgetary Institution "Research Institute of Influenza named after A.A. Smorodintsev» of the Ministry of Health of the Russian Federation*
*(197376, St. Petersburg, ul. prof. Popova 15/1, e-mail: gorodmir_80@mail.ru)*
**KOZMIN Yuri Petrovich,** researcher Laboratory of molecular biophysics
*Institute of Bioorganic Chemistry. Academicians M.M. Shemyakin and Yu.A. Ovchinnikov RAS*
*(Moscow, 117997, GSP-7, Miklukho-Maklaya str., 16/10, e-mail: uriakozmin@yandex.ru)*
**BUBLYAEV Rostislav Anatolyevich,** candidate of physical and mathematical sciences, researcher Biomedical mass spectrometry laboratories
*Institute of Analytical Instrumentation of the Russian Academy of Sciences*
*(St. Petersburg, ul. Ivana Chernykh, 31-33, e-mail: bub-slava@yandex.ru)*
**MALYUTENKOVA Svetlana Michailovna,** candidate of technical sciences, associate professor Graduate school of service and trade
*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*
*(194021, Russia, Saint-Petersburg, Polytechnic Street, 29, e-mail: malutesha66@mail.ru)*

**Abstract.** In this work, we have studied some properties of azoloazines that contain a nitro group in their structure. These include triazoverine (*TZV*), used in medical practice as a drug, and a number of its synthetic analogues. Given the presence of the nitro group, it seemed appropriate to evaluate the possibilities of its interaction with a number of protein objects. The purpose of this work was to identify the side effects that *TZV* can cause, since the presence of a nitro group in its structure can lead to interaction with a number of protein objects. Therefore, the objective of this study was to study *TZV* and its specially synthesized analogues and their interaction with functional human peptides. A number of biologically active peptides (both native and their synthetic analogues), as well as one of the functional proteins of human blood serum - angiotensin, were selected as objects of action (research). The presence of a nitro group in all the studied objects made it possible to evaluate their interaction with a number of biologically active peptides and with angiotensin. In this paper, using glutathione (*GSH*), one of the most important biologically active compounds, as an example, we consider the participation of *TZV* in stimulating processes with the formation of intermolecular disulfide bonds, since thiol-containing compounds are present in fairly high concentrations in biological environments. The results obtained indicate a wide range of *TZV* participation in various processes involving thiol-containing products. And these processes are more active for compounds with higher concentrations, since these are bimolecular reactions, unless there has been preliminary complexation, which turns this process into an "intramolecular" reaction. The results obtained indicate a wide range of *TZV* participation in various processes involving thiol-containing products. And these processes are more active for compounds with higher concentrations, since these are bimolecular reactions, unless there has been preliminary complexation, which turns this process into an "intramolecular" reaction. From the obtained results, it can be concluded that triazoverine will cause fewer side effects than its other analogues studied in this work.

**Keywords:** azoloazines, triazoverine, *MALDI-MS* mass spectrometric method, azaindolizines, human serum proteins.

*Для цитирования: Миргородская О.А. Использование MALDI-MS для изучения взаимодействия азаиндолизинов с объектами белковой природы / О.А. Миргородская, Ю.П. Козьмин, Р.А. Бубляев, С.М. Малютенкова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 4(68). – С. 142-152. – EDN: LCKNZX.*

**Введение.** Азолоазины – структурные аналоги пуриновых оснований (аденина, гуанина), что обуславливает их активность в качестве антиметаболитов или агонистов различных рецепторов, имеют большой потенциал для создания эффективных структур с использованием различных синтетических подходов [1-3]. Их разнообразные биологические свойства и возможности модификации структуры делают азоазины интересным объектом для исследований в области медицинской химии и разработки новых биологически активных и лекарственных препаратов.

Из литературных данных известно, что среди синтетических аналогов пуринов, к которым относятся азаиндолизин (азолоазин) [4-6], найдены соединения с высокой противоопухолевой и противовирусной активностью [7-9]. Предполагалось, что эти соединения могут выступать в роли антиметаболитов, и тем самым приводить к нарушению ряда важнейших биохимических процессов и, прежде всего, синтеза нуклеиновых кислот. Вместе с тем, при ведении в подобные соединения дополнительных реакционных групп можно было бы рассчитывать на расширение объектов, с которыми они могут взаимодействовать. Таким образом, азоазины представляют собой перспективный класс соединений с широким спектром возможных применений, и, в настоящее время, особенно в области медицинской химии и фармакологии.

В данном исследовании были рассмотрены определенные характеристики соединений, включающих в свою структуру нитрогруппу. Среди них был исследован триазоверин (*TZV*), применяемый в медицине как лекарственное средство, а также ряд его искусственно синтезированных аналогов [10-12]. Триазоверин является синтетическим аналогом пуриновых нуклеозидных оснований. Триазоверин

также проявляет активность против некоторых ДНК-содержащих вирусов, таких как цитомегаловирус. Это делает его важным для лечения различных вирусных стадий у пациентов, включая грипп, герпес и клещевой энцефалит. Помимо противовирусной активности, триазоверин также обладает иммуномодулирующими механизмами, способствуя усилению иммунного ответа организма на вирусную инфекцию. Это позволяет более эффективно бороться с вирусами и ускорить выздоровление.

Таким образом, триазоверин является эффективным противовирусным препаратом широкого спектра действия, который можно использовать для лечения различных вирусных заболеваний у пациентов [13-15]. Для изучения взаимодействия триазоверина с белками можно использовать различные методы, такие как эксперименты «*in vitro*», компьютерное моделирование или методы биохимии. При проведении таких исследований можно определить специфичность взаимодействия, аффинность связей, механизм действия и возможные последствия для фармакокинетики и фармакодинамики препаратов.

Изучение вопросов взаимодействия триазоверина с белками позволит не только лучше понять его фармакологические свойства, но и выявить возможные риски или преимущества при его применении. Анализ такого взаимодействия может быть использован при разработке новых биологически активных препаратов на основе триазоверина или при оптимизации его терапевтического эффекта.

**Методология.** В данном исследовании для анализа взаимодействия биомолекул с различными соединениями был выбран метод масс-спектрометрии *MALDI-MS* (*matrix-assisted laser desorption ionization mass spectrometry*), широко применяемый в протеомике и анализе биомолекул благодаря своей способности определять массу молекул с высокой точностью [16-18]. Этот метод позволяет идентифицировать и количественно определять пептиды и белки даже в сложных смесях. В качестве исследуемых объектов были выбраны несколько биологически активных пептидов, включающих как естественные (нативные) пептиды, так и их синтетические аналоги, структуры которых были модифицированы для изучения влияния изменений в аминокислотной последовательности на их взаимодействие с исследуемыми соединениями. Использование изотопно-меченной воды позволяет проводить количественный анализ изменений в белках, вызванных взаимодействием с исследуемыми веществами. Взаимодействие с изотопно-меченной водой, например, может быть показателем изменения конформации или степени гликозилирования белка.

Таким образом был определен ряд биологически активных пептидов (как нативных, так и их синтетических аналогов), а также один из функциональных белков сыворотки крови человека – ангиотензин. Определенные типы азолоазинов (табл. 1) были синтезированы и любезно предоставлены профессором В.П. Русиновым из Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. Для исследования использовался стабильный изотоп воды $H_2{}^{18}O$ (97% атомарного $^{18}O$), приобретенный у компании *Sigma-Aldrich* (каталожный номер 329878).

Объектами исследования также являлись специально синтезированные пептиды в определенной аминокислотной последовательности, характерной для двух штаммов вируса гриппа (*HA-III* и *HA-IV*): пептид *HA-III* в последовательности *LCKLGGIAPL-HLGKCN-amid*, пептид *HA-IV* в последовательности *LCDLNGVKPLILRDCS-amid*.

Масс-спектры получены с помощью масс-спектрометра *Ultraflex II MALDI-TOF/TOF* (*Bruker Daltonics*, Германия), оборудованного лазером *Nd:YAG* (*neodymium-doped yttrium aluminum garnet*; *Nd:Y3Al5O12*). Использование прибора *Ultraflex II MALDI-TOF/TOF* с лазером *Nd:YAG* позволяет проводить качественный и количественный анализ молекулярных образцов с высокой точностью и чувствительностью.

Регистрация пептидов осуществлялась в виде положительно заряженных ионов, а *α*-циано-4-гидроксикоричная кислота (*Bruker Daltonic*, Germany) использовалась в качестве матрицы. Точность определения моноизотопных масс достигала не менее 25 ppm (частей на миллион).

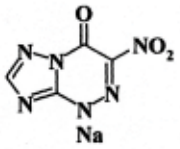
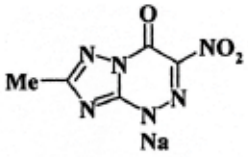
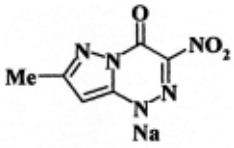
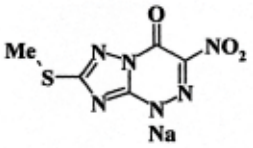
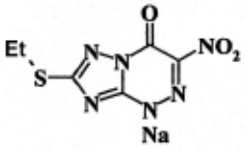
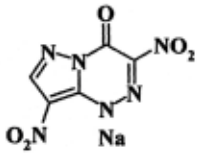
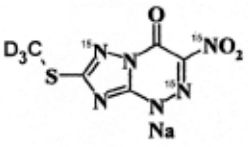
Азолоазины детектировали в виде отрицательных ионов с использованием той же матрицы *α*-циано-4-гидроксикоричная кислоты (*Bruker Daltonic*, Germany).

Количественное определение *TZV* осуществлялось посредством сравнения его интенсивности с интенсивностью стандарта, представляющего собой аналог *TZV*, синтезированный с включением изотопов *D* и *15N*.

Результаты. *1. Масс-спектрометрический анализ TZV и его аналогов.* В таблице 1 представлены структуры *TZV* и ряда его аналогов. Молекулярная масса синтезированных соединений подтверждена масс-спектрометрически с использованием *MALDI-MS*.

Оказалось, что все эти соединения легко регистрируются в режиме отрицательных ионов, причем все они не нуждаются в использовании матрицы. Особую ценность представляет последнее обстоятельство в связи с тем, что матрица, как правило, генерирует побочные ионы в том же диапазоне, что и азаиндолизины. Тем же способом были сняты масс-спектры всех остальных азаиндолизинов, использованных в настоящей работе. Полученные значения *m/z* (масса/заряд) в отрицательной моде полностью соответствуют их структурным формулам, представленым в таблице 1. В качестве примера на рисунке 1 представлены *MALDI-MS* спектры для двух соединений этого ряда – *TZV* и *TZV-802*.

*Таблица 1 – Обозначения, структура и некоторые характеристики ряда синтетических аналогов пуринов – аза-индолизинов*

| Шифр | Структура | Брутто-формула | m/z в отр. моде | Относительная скорость окисления | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | M без Na | НА-III | НА-IV |
| TZ (триазид) |  | $[C_4HN_6O_3]^-$ $Na^+$ | 181.01 | 1 | 1 |
| *TZV*-3 |  | $[C_5H_3N_6O_3]^-$ $Na^+$ | 195.03 | 1 | 0.5 |
| *TZV*-7 |  | $[C_6H_4N_5O_3]^-$ $Na^+$ | 194.03 | 0.5 | 0.5 |
| *TZV* |  | $[C_5H_3N_6O_3S]^-$ $Na^+$ | 227.00 | 10 | 10 |
| *TZV*-802 |  | $[C_6H_5N_6O_3S]^-$ $Na^+$ | 241.01 | 4 | 3 |
| *TZV*-6 |  | $[C_5HN_6O_3]^-$ $Na^+$ | 223.99 | 11 | 12 |
| TS-657 or $D_3{}^{15}N_3$- -*TZV* |  | $[C_5D_3N_6O_3S]^-$ $Na^+$ | 230.00 | – | – |

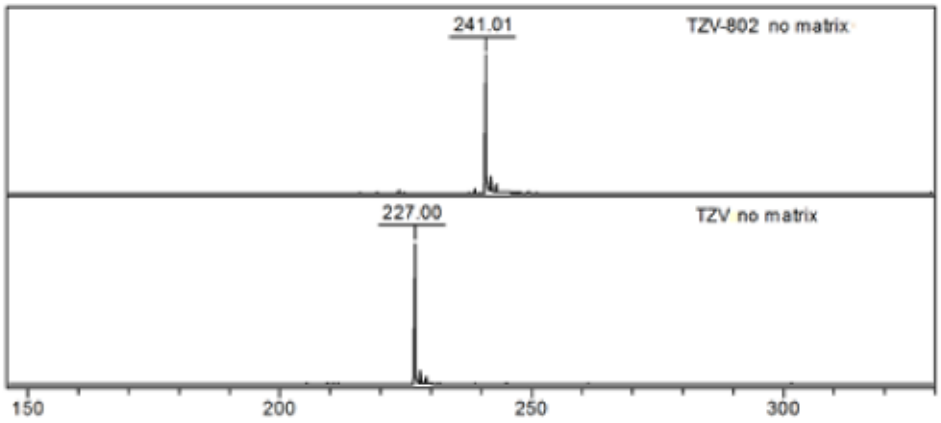



*Рисунок 1 – MALDI-MS спектры TZV и TZV-802 в отрицательной моде без матрицы*

*2. Участие азаиндолизинов в образовании дисульфидных связей у тиол-содержащих соединений. Окислительная способность TZV в отношении смеси пептидов в сравнении с традиционными окислительными реагентами ($SeO_2$, $H_2O_2$).* В синтетических пептидах (являются фрагментами гемагглютинина (*HA*) для двух штаммов вируса гриппа *HA-III* и *HA-IV*), представленных в таблице 2, в каждом присутствуют остатки цистеина (*Cys*), что указывает на наличие дисульфидных мостов, обеспечивающих определенную структурную устойчивость пептидов. Наличие дисульфидных мостов может также влиять на их биологическую активность и функционирование, хотя в исходных белках, из которых эти пептиды синтезированы, внутренние дисульфидные связи *Cys* не образует.

Предполагалось, что нитрогруппа, обнаруженная в молекуле *TZV* и его аналогах, будет способствовать об-разованию дисульфидных связей благодаря наличию двух *Cys* остатков в каждом из пептидов, в ходе реакции могут образовываться связи как внутри молекул, так и между ними, но образование внутримолекулярных связей будет доминировать.

Одновременное образование внутримолекулярных связей между двумя пептидами в реакционной среде приводит к образованию различных типов димеров, а также к наличию стадии предварительного комплексообразования с участием пептидов.

С этой целью были проведены эксперименты по взаимодействию смеси двух пептидов с I и рядом других окислителей для сравнительного анализа. Выбранные в качестве окислителей реагенты и их соотношения представлены в таблице 3. Окисление проводилось при температуре 37°C в присутствии 25 мМ $NH_4HCO_3$, время реакции указано на спектрах, а также отдельные фрагменты этих спектров представлены на рисунках 2-4.

*Таблица 2 – Характеристики синтетических пептидов из двух штаммов гемагглютинина*

| Пептид | Последовательность | Гемагглютинин штамм | Координаты пептида | ММ $(SH)_2$ |
|---|---|---|---|---|
| HA-III | LCKLGGIAPLHLGKCN-amid | H1N1 | 58–73 | 1634.9 |
| HA-IV | LCDLNGVKPLILRDCS-amid | H5N1 | 57–72 | 1756.9 |

*Таблица 3 – Состав реакционных смесей для окисления пептидов HA-III и HA-IV*

| № | HA-III | HA-IV | $SeO_2$ | TZV | $H_2O_2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| | mM | mM | mM | mM | M |
| 1 | 0.12 | 0.12 | 2 | | |
| 2 | 0.12 | 0.12 | | 9 | |
| 3 | 0.12 | 0.12 | | | 1 |
| Контроль<br>25 мМ $NH_4HCO_3$<br>2% TFA (трифторуксусная кислота) | 0.12 | 0.12 | | | |

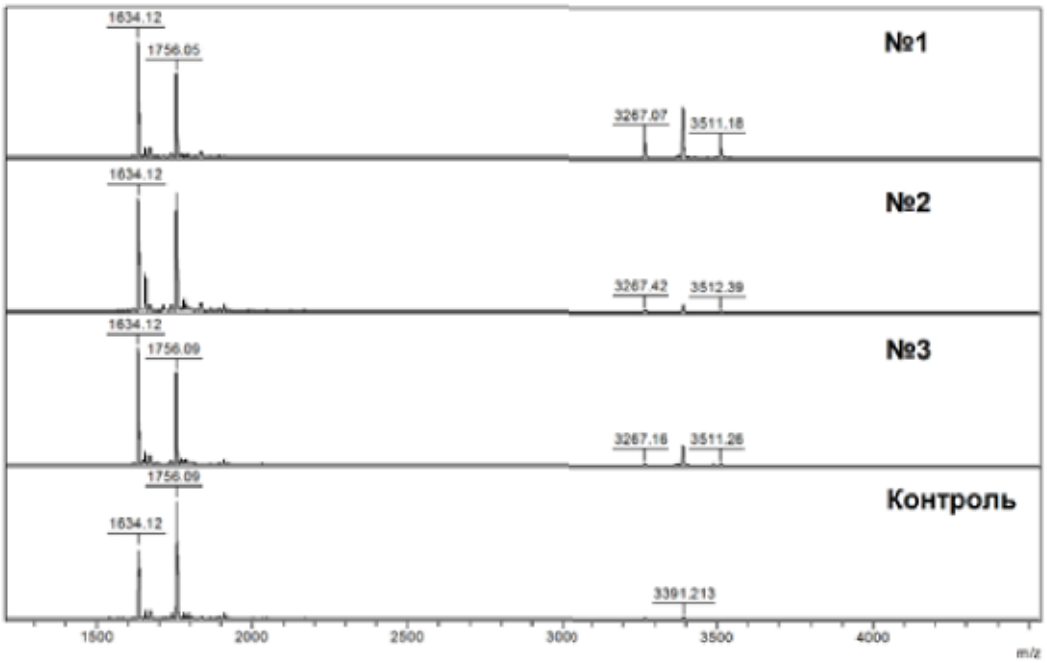



*Рисунок 2 – Фрагменты MALDI-MS смесей 1-3 через 70 мин инкубации при 37°C*

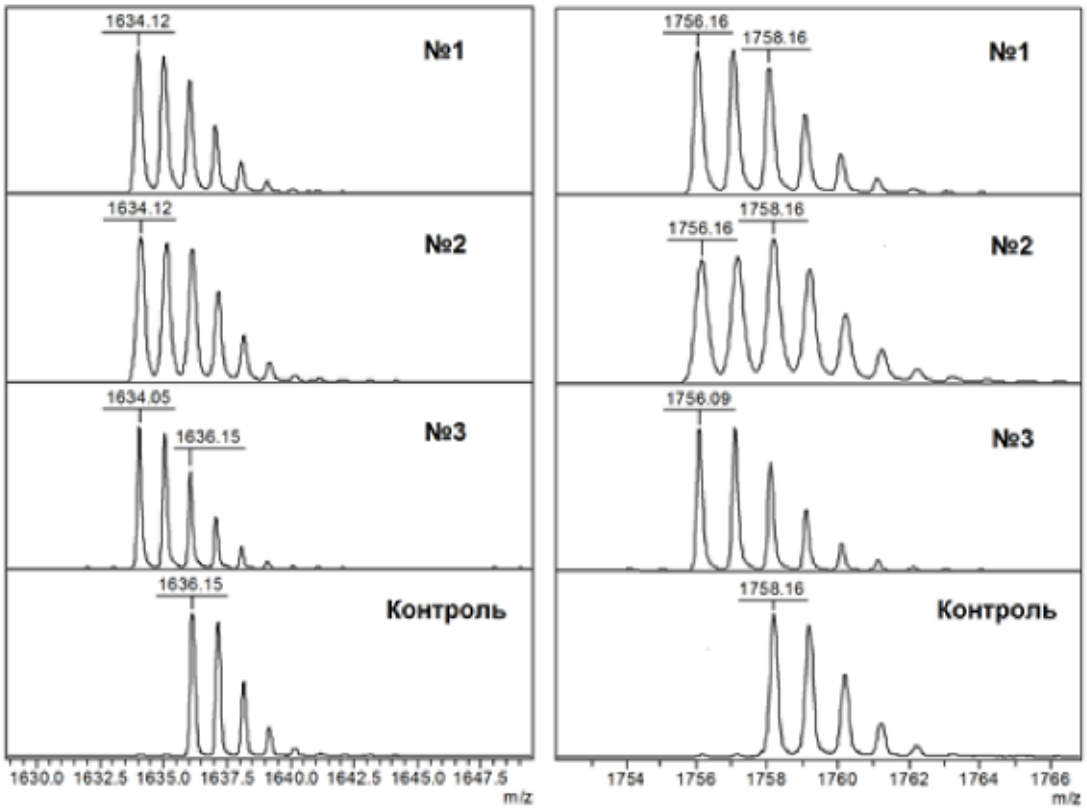



*Рисунок 3 – Фрагменты MALDI-MS спектров мономерных форм пептидов через 70 мин инкубации при 37°С*

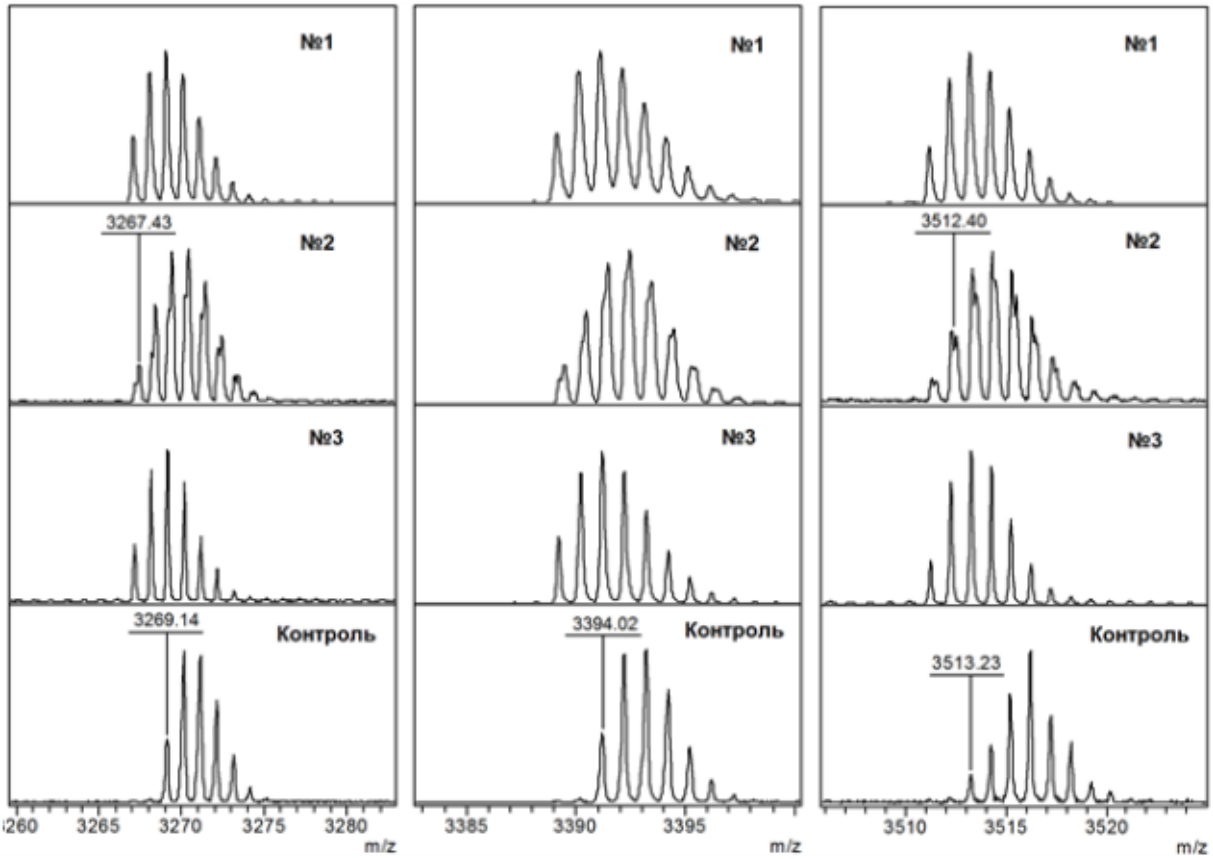



*Рисунок 4 – Фрагменты MALDI-MS спектров гомо- и гетеродимеров в смесях через 70 мин инкубации при 37°С*

*3. Оценка окислительной способности азаиндолизинов.* В качестве буферной среды при инкубации *TZV* и каждого из его аналогов использовался раствор бикарбоната аммония с концентрацией 50 мМ, обладающий *pH*, близким к физиологическим показателям. Реакция прерывалась в заданные интервалы времени посредством добавления эквивалентного объема 2% *TFA*, после чего образец анализировался методом *MALDI-MS*.

На рисунках 5 и 6 представлены результаты масс-спектрометрического исследования, проведенного для трех соединений: *TZ*, *TZV* и *TZV-802*.

Для сравнения приведены также данные контрольных измерений пептидов до окисления и после спонтанного окисления в идентичных условиях.

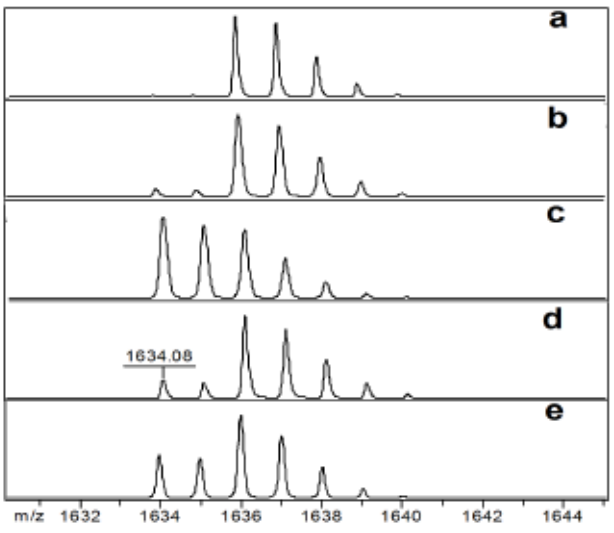



*Рисунок 5 – MALDI-MS спектры пептида HA-III:*
**(a) до окисления,*
**(b) после окисления в буферном растворе,*
**(c) после окисления в присутствии TZV в буфере,*
**(d) после окисления в присутствии TZ в буфере,*
**(e) после окисления в присутствии TZV-802 в буфере,*
*Инкубация смесей проводилась в течение 3 минут при температуре 20°C*

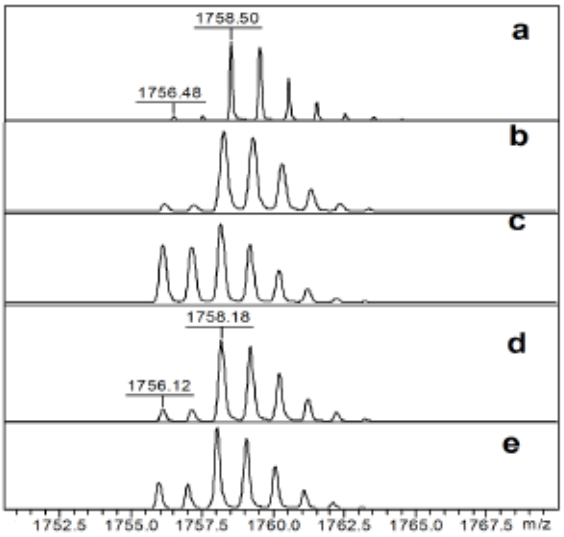



*Рисунок 6 – MALDI-MS спектры для пептида HA-IV в различных условиях:*
**(a) Неокисленный пептид.*
**(b) Пептид после окисления в буфере.*
**(c) Пептид после окисления в буфере в присутствии TZV.*
**(d) Пептид после окисления в буфере в присутствии TZ.*
**(e) Пептид после окисления в буфере в присутствии TZV-802.*
*Все инкубации проводились при 20°C в течение 3 минут*

*4. Влияние TZV на образование дисульфидных связей с участием глутатиона в восстановленной форме.* Тиолы – это органические соединения, содержащие –*SH* группу; из-за своей способности образовывать дисульфидные мостики тиолы могут сыграть решающую роль в формировании и функционировании белков. Еще одним свойством является их способность участвовать в различных биологических процессах, таких как регуляция клеточного метаболизма, каскады сигнальных путей и транспорт молекул через мембраны клеток. Рассмотрим возможное участие *TZV* в стимулировании процессов с образованием межмолекулярных дисульфидных связей на примере одного из таких соединений – *GSH*, одного из важнейших активных соединений в биологических средах [19, 20].

Для самого *GSH*, который представляет собой трипептид, в состав которого входит *Cys*, можно ожидать образование соответствующего его димера – окисленной формы глутатиона (*GSSG*). При наличии в окружающей среде других тиол-содержащих соединений белковой природы возможно ожидать образование продуктов присоединения к ним *GSH*.

Качественно эти процессы были проверены на примере *GSH* и одного из пептидов, а именно на пептиде *HA-IV*, структура которого представлена в таблице 2.

С участием этих двух образцов были приготовлены реакционные смеси с значением *pH*, близкому к физиологическому как в присутствии, так и в отсутствии *TZV*. Состав приготовленных смесей (соотношение реагентов обусловлено формированием смеси, приближенной к бикарбонатной буферной системе внеклеточной жидкости и крови) представлен в таблице 4.

Реакция проводилась при комнатной температуре в течение 17 часов и останавливалась добавлением эквивалентного объема 2% *TFA*. Состав смеси определялся масс-спектрометрически.

На рисунке 7 представлены результаты масс-спектрометрического анализа реакционных смесей *GSH* в буфере в присутствии и в отсутствии *TZV*. Сам *GSH* регистрируется в смеси в виде иона *M+H* (*m/z*=308) малой интенсивности, однако продукт его окисления *GSSG* четко регистрируется в виде иона с *m/z*=656.15 в виде натриевой соли по двум карбоксильным группам

и только в смеси, где был добавлен *TZV*. Из данных, представленных на рисунке 8, для *GSH* четко видно стимулирующее влияние *TZV* на образование димера *GSSG* (по появлению соответствующих этому соединению ионов).

На рисунке 8 представлены соответствующие масс-спектры реакционных смесей пептида *HA-IV* и *GSH* без *EZV* и с добавлением *TZV*.

*Таблица 4 – Состав реакционных смесей для изучения влияния TZV на процессы окисления GSH и пептида HA-IV*

| № | пептид HA-IV $5x10^{-3}$M | GSH $4x10^{-2}$M | TZV $5x10^{-2}$M | $NH_4HCO_3$ 0.1M | $H_2O$ |
|---|---|---|---|---|---|
| | µl | | | | |
| 1 | 5 | - | - | 2.5 | 2.5 |
| 2 | 5 | - | 2 | 2.5 | 0.5 |
| 3 | - | 0.5 | 2 | 2.5 | 5 |
| 4 | - | 0.5 | - | 2.5 | 7 |
| 5 | 5 | 0.5 | 2 | 2.5 | 0 |
| 6 | 5 | 0.5 | - | 2.5 | 2 |

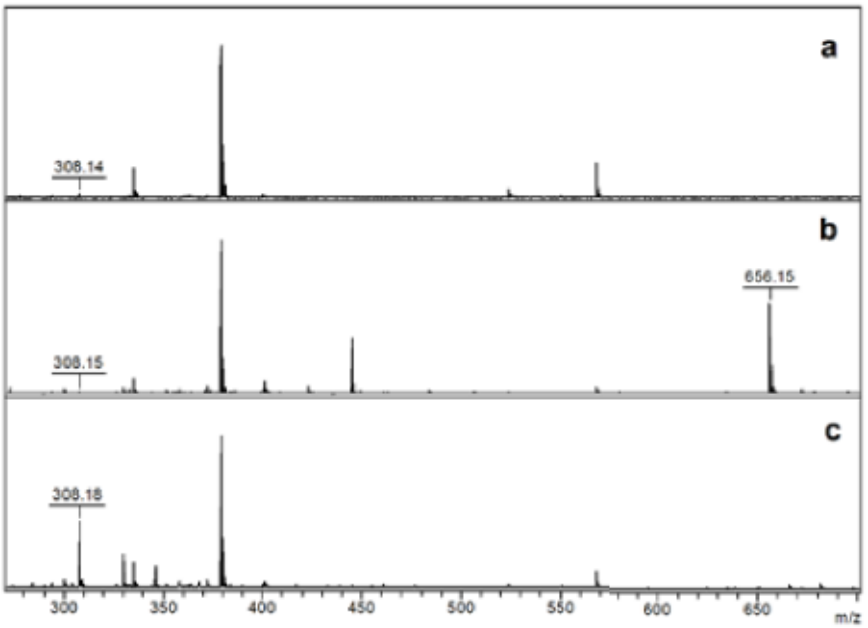



*Рисунок 7 – Результаты масс-спектрометрического анализа реакционных смесей глутатиона в буфере для контрольного раствора до начала реакции (a), в присутствии TZV (b) и без TZV (c) после 17 часов инкубации*

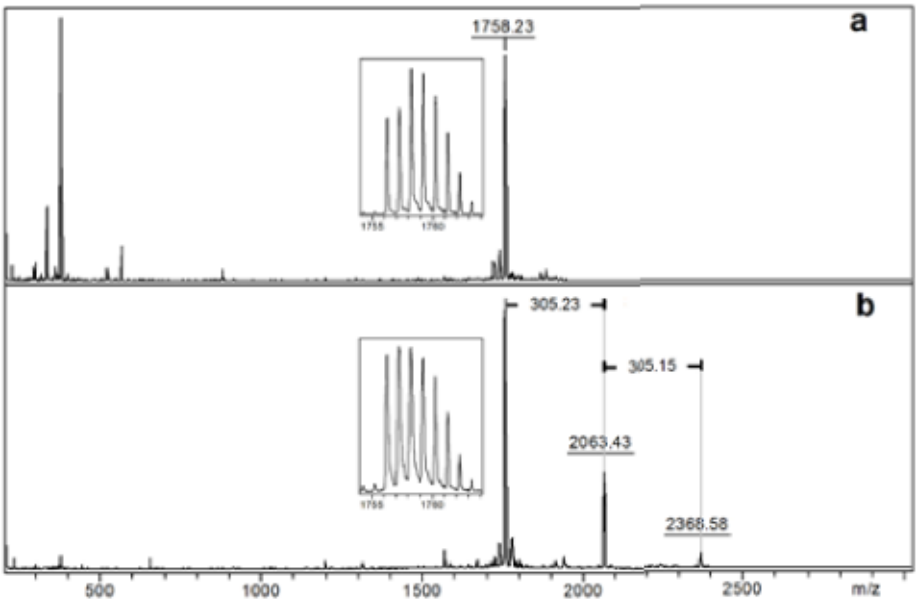



*Рисунок 8 – Результаты масс-спектрометрического анализа реакционных смесей пептида глутатиона без (a) и в присутствии TZV (b) через 17 часов инкубации*

*5. Влияние препаратов TZ и TZV на способность ангиотензинпревращающего фермента (ACE) катализировать расщепление неактивного ангиотензина I (AngI) до активного ангиотензина II (AngII) в сыворотке крови донора.* Оценка скорости гидролиза *AngI* проводилась с посредством *MALDI-MS* с использованием изотопно-меченого стандарта *AngII*, обогащенного стабильным изотопом кислорода 18O. Данный метод основан на изотопном обмене и описан в работе [18].

Характеристика полученного стандарта представлена на рисунке 9. На этом рисунке представлены данные по изменению концентрации *AngII* в сыворотке крови до и после внесения препаратов. Сыворотка разбавлена 1:50. Везде внесен *AngI* в одинаковой концентрации. Обработка представленных результатов масс-спектрометрических измерений представлена на рисунке 10.

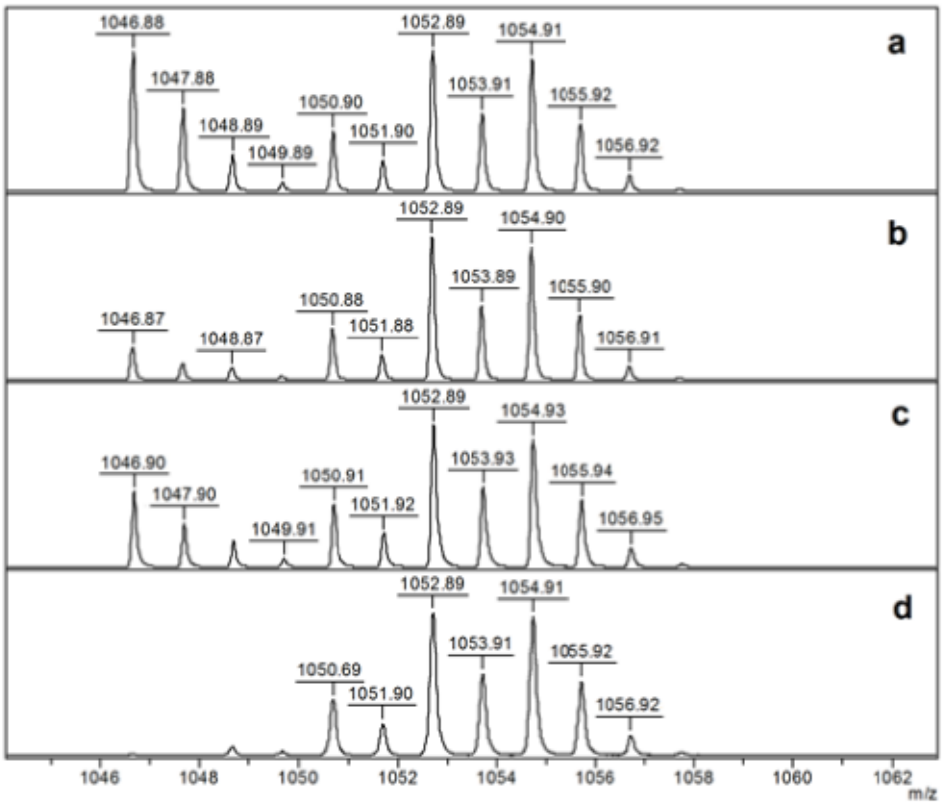



*Рисунок 9 – Фрагменты MALDI-MS спектров продукта AngII в гидролизатах AngI в сыворотке донора при 37°C в присутствии стандарта (a), с добавлением TZV (b), с добавлением TZ (c), меченный стандарт AngII (d)*

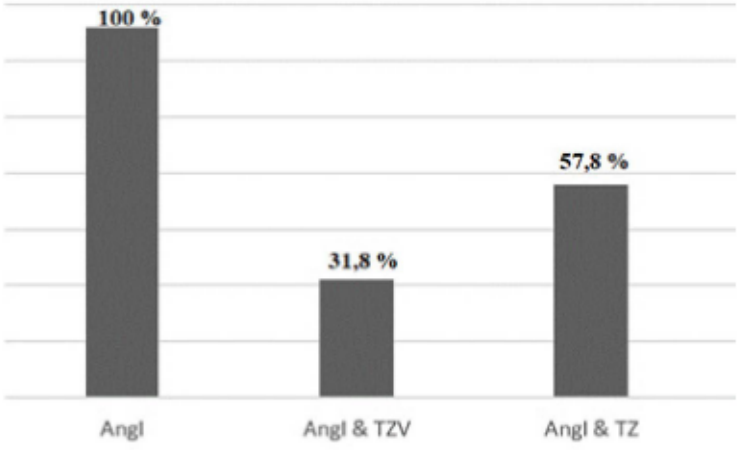



*Рисунок 10 – Относительная скорость гидролиза AngI в сыворотке донора в присутствии TZ и TZV*

**Обсуждение.** Эксперименты по взаимодействию смеси синтетических пептидов из двух штаммов гемагглютинина (табл. 2) с *TZV* и рядом других окислителей для сравнения (табл. 3) показали, что все выбранные реагенты демонстрируют каталитическое действие в процессе формирования дисульфидных связей (по сравнению с контролем). В результате реакций образуются не только мономеры, но и разного типа димеры с одной дисульфидной связью несмотря на то, что наличие 4-х тиольных групп позволяет образоваться двум дисульфидным связям. Замечено, что при окислении в наибольшем количестве образуются именно гетеродимеры. При этом в контроле наблюдаются комплексы гомо- и гетеродимеров, имеющие примерно такое же распределение. Для всех испытанных типов окислителей имеет место образование только одной дисульфидной связи.

Из полученных данных (рис. 5, б) следует, что наибольшей окислительной способностью обладает *TZV*, а наименьшей *TZ*. Следует обратить внимание, что пептид *HA-III* и пептид *HA-IV* образуют окисленную форму в заметно различных количествах. Это может быть связано с особенностями структуры и составом аминокислот в каждом из пептидов вблизи *Cys*, которые влияют на их способность к окислению. Пептид *HA-III* содержит больше основных аминокислот в микроокружение вблизи *Cys*, склонных к окислению, и это приводит к более активному образованию окисленной формы. Таким образом, микроокружение *Cys* играет решающую роль в процессе образования дисульфидных связей.

Только в присутствии *TZV* наблюдается образование димеров и димеров с присоединением молекул *GSH*, что убедительно демонстрирует роль *TZV* в стимулировании процессов образования двух типов гетеродимеров. В тоже время, в аналогичных условиях, но без *TZV*, гетеродимеры не регистрируются. Также необходимо отметить, что присутствие пептида изменяет направление реакции – пропадает *GSSG* (продукт окисления самого *GSH*). Однако регистрируется образование двух продуктов *GSH* с пептидом – с образованием одной и двух дисульфидных связей. Как следует из таблицы 3, в реакции суммарное молярное соотношение тиольных групп и *TZV* равно 1:1. В этих условиях сам пептид частично окисляется с образованием одной дисульфидной связи, также, как и в смесях №1 и №2 (табл. 4), что приводит к появлению пептида с *m/z* на 2 Да меньше.

Введение в сыворотку крови *TZV* и *TZ* приводит к снижению скорости гидролиза, а, следовательно, и активности ангиотензин-превращающего фермента в 2 и в 3 раза, соответственно. Причем, *TZV* проявляет значительно большую ингибирующую способностью по сравнению с *TZ*.

**Выводы.** Выбор двух гомологичных пептидов (*HA-III* и *HA-IV*), содержащих по два остатка *Cys*, себя оправдал, поскольку позволил одновременно отразить некоторую общность процессов с участием разных окислителей и специфику поведения в одинаковых условиях этих двух объектов.

Выбор этих двух пептидов для оценки окислительной способности позволяет также оценить, насколько велико влияние структуры пептида на окислительные свойства *TZV* и его аналогов. Как следует из представленных результатов, в процессе инкубации пептидов происходит образование дисульфидных мостиков, что приводит к созданию ковалентной связи между двумя цепями пептида. Оценка этого роста, с учетом изотопного распределения каждой из форм и вычетом спонтанного окисления пептидов в буфере, представлена в таблице 1. За единицу принята доля окисленной формы с *TZV*. Заметим, что в этих условиях окисления, когда *pH*, близок к физиологическим значениям, *TZV* и его аналоги являются анионами, т.е. «несут» отрицательный заряд.

Полученные результаты указывают на широкий спектр участия *TZV* в различных процессах с участием тиол-содержащих продуктов. И эти процессы идут активнее для соединений с более высокими концентрациями, поскольку это бимолекулярные реакции, если только не имело место предварительное комплексообразование, которое превращает этот процесс условно во «внутримолекулярную» реакцию.

Является ли каждый конкретный процесс полезным или наоборот приведет в организме человека к нежелательным последствиям, – предмет дальнейших научных исследований. В некотором смысле полезным представляется то обстоятельство, что подобные реакции обратимы в некоторых условиях. В конечном итоге использование каждого из предполагаемых препаратов в качестве лекарственного средства определяется серией медико-биологических исследований. Однако совокупность полученных сведений позволит продвинуться в понимании возможный механизм их действия *TZV* и его аналогов [21].

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Pinheiro, S. Biological activities of [1,2,4] triazolo[1,5-a] pyrimidines and analogs / S. Pinheiro, E.M.C. Pinheiro, E.M.F. Muri, J.C., Pessôa et al // Medicinal Chemistry Research. – 2020. – V. 29. – P. 573-599.

2. Verbitskiy, E.V. Recent advances in direct C–H functionalization of pyrimidines / E.V. Verbitskiy, V.L. Rusinov, O.N. Chupakhin, V.N. Charushin // Synthesis. – 2018. – V. 50(2). – P. 193-210.

3. Русинов, В.Л., Петров, А.Ю., Постовский, И.Я. Синтез нитропроизводных азоло[5,1-c][1,2,4]триазинов / / Химия гетероциклических соединений. – 1980. – №9. – С. 1283-1285.

4. Русинов, В.Л.; Чарушин, В.Н.; Чупахин, О.Н. Биологически активные азоло-1,2,4-триазины и азолопиримидины / Russ. Chem. Bull. – 2018. – № 1. – P. 573-599.

5. Саватеев, К.В. Азолоазины – антагонисты А2α-рецептора. Структура и свойства / К.В. Саватеев, Е.Н. Уломский, И. И. Буторин … [и др.] // Успехи химии: журн. – 2018. – Т. 87, № 7. – С. 636-669.

6. Мухин, Е.М., Русинов, В.Л., Саватеев, К.В. Неприродные С-нуклеозиды в ряду азолоазинов / Е.М. Мухин, В.Л. Русинов, К.В. Саватеев / в книге: МедХим-Россия 2021. // Сборник тезисов 5-ой Российской конференции по медицинской химии с международным участием. – Волгоград. – 2022. – С. 31.

7. Никифоров, Е.А. Стратегия С-Н арилирования азолоазинов ароматическими аминами в дизайне перспективных противовирусных препаратов / Е.А. Никифоров, Н.В. Васькина, Т.Д. Мосеев … [и др.] // Современные синтетические методологии для создания лекарственных препаратов и функциональных материалов (MOSM 2021):

V Международная научно-практическая конференция: материалы и доклады (Екатеринбург, 8-12 ноября 2021 г.). – Екатеринбург: ИП Шестакова Екатерина Вячеславовна, 2021. – С. 175

8. Мухин, Е.М. С-нуклеозиды азолоазинового ряда – структурные аналоги ремдесивира и триазавирина / Е.М. Мухин, В.Л. Русинов, К.В. Саватеев // Современные синтетические методологии для создания лекарственных препаратов и функциональных материалов: Сборник тезисов VI Международной конференции, Екатеринбург, 07-11 ноября 2022 года. – Екатеринбург: ИП Шестакова Екатерина Вячеславовна, 2022. – С. I-17.

9. Русинов, В.Л. Конденсированные азолоазины с противодиабетической активностью / В.Л. Русинов, И.М. Сапожникова, А.А. Спасов, О.Н. Чупахин // Известия Академии наук. Серия химическая – 2022. – № 12. – С. 2561-2594.

10. Тихонова, Е.П. Изучение эффективности противовирусных препаратов (умифеновира, триазавирина) в отношении острых респираторных вирусных инфекций / Е.П. Тихонова, Т.Ю. Кузьмина, Н.В. Андронова… [и др.] // Казанский мед. ж. – 2018. – №2. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/izuchenie-effektivnosti-protivovirusnyh-preparatov-umifenovira-triazavirina-v-otnoshenii-ostryh-respiratornyh-virusnyh-infektsiy (дата обращения: 23.07.2024).

11. Chupakhin, O.N. A Novel Effective Antiviral Drug / O.N. Chupakhin, V.L. Rusinov, M.V. Varaksin et al. // Int. J. Mol. Sci. – 2022. – 23. – 14537. URL: https://doi.org/10.3390/ ijms23231453 (дата обращения: 26.07.2024).

12. Шестакова, Т.С. Селективно меченный стабильными изотопами 2H, 13C, и 15 N, противовирусный препарат Триазавирин. Синтез и свойства. / Т.С. Шестакова, С.Л. Деев, И.А. Халымбаджа [и др.] // Химия гетероциклических соединений. – 2021. – Т. 57. – № 4 – С. 479-482.

13. Voinkov, E.K., Drokin, R.A., Ulomskiy, E.N. et al. Crystal Structure of Medicinal Product Triazavirin. J Chem Crystallogr 49, 213-218 (2019). https://doi.org/10.1007/s10870-018-0750-2.

14. Ивойлова, А.В.; Михальченко, Л.В.; Цмокалюк, А.Н.; Козицина, А.Н.; Иванова, А.В.; Русинов, В.Л. Окислительно-восстановительные превращения нового противовирусного препарата Триазавирин®: электрохимическое исследование и ЭПР-спектроскопия. Вестник Рос. хим. 2021, 70, 1099-1108.

15. Касьяненко, К.В. Оценка эффективности риамиловира в комплексной терапии больных COVID-19 / К.В. Касьяненко, К.В. Козлов, О.В. Мальцев [и др.] // Терапевтический архив. – 2021. – 93. – С. 291-295.

16. Protasov, A.V., Mirgorodskaya, O.A, Kozmin, Y.P., Gobom, J. A mass spectrometric approach to study the interaction of amyloid β peptides with human α-2-macroglobulin / A.V. Protasov, O.A. Mirgorodskaya, Y.P. Kozmin, J. Gobom // Biochimie. – V. 191 – P. 62-68.

17. Протасов, А.В., Бубляев, Р.А., Миргородская, О.А. Количественная масс-спектрометрия в диагностике гриппа и контроле действия лекарственного препарата «ТРИАЗАВИРИН» // Научное приборостроение. – 2020. – Том 30. – № 1. – С. 55-61.

18. Kozmin, Yu.P., Manoilov, A.V., Serebryakova, M.V., Mirgorodskaya, O.A., A Direct Introduction of O-18 Isotopes into Peptides and Proteins for Quantitative Mass Spectroscopy Analysis, RJBC, 2011, 37(6), 719-731.

19. Chakravarthi S, Jessop CE, Bulleid NJ. The role of glutathione in disulphide bond formation and endoplasmic-reticulum-generated oxidative stress. EMBO Rep. 2006 Mar;7(3):271-5. doi: 10.1038/sj.embor.7400645. PMID: 16607396; PMCID: PMC1456887.

20. Корчина, Т.Я. Анализ глутатионового звена антиоксидантной системы защиты у мужчин северного региона с различным уровнем антропогенной нагрузки / Т.Я. Корчина, В.И. Корчин // Технологии живых систем. – 2019. – Т. 16, № 3. – С. 47-55.

21. Ляпустин, Д.Н., Федотов В.В., Уломский Е.Н., Русинов В.Л., Чупахин О.Н. Последние достижения в химии двухуглеродных нитросодержащих синтетических эквивалентов / Д.Н. Ляпустин, В.В. Федотов, Е.Н. Уломский, В.Л. Русинов, О.Н. Чупахин. // Успехи химии. – 2023. – Том 92. – Номер 4. – С. 1-59.

*Статья поступила в редакцию 05.09.2024*
*Статья принята к публикации 13.12.2024*

УДК 663.05:664.788.3
EDN: ZSYDNF

# ПОДТВЕРЖДЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ МЕЛАНИНА, ВЫДЕЛЕННОГО ИЗ ЛУЗГИ *FAGOPYRUM ESCULENTUM*

© Автор(ы) 2023

SPIN: 7714-7397
AuthorID: 998566
ORCID: 0000-0002-6847-8487

**УРАЗОВА Яна Валерьевна**, аспирант, старший преподаватель кафедры биотехнологии
*Бийский технологический институт (филиал)*
*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова*
*(659305, Россия, Бийск, ул. Героя Советского Союза Трофимова, e-mail: urazova.iav@bti.secna.ru)*

SPIN: 2560-9524
AuthorID: 1179088
ORCID: 0000-0001-5126-6616

**КАДРИЦКАЯ Елена Александровна**, кандидат технических наук,
директор Школы гостеприимства и сервиса
*Уральский государственный экономический университет*
*(620144, Россия, Екатеринбург, улица 8 Марта/Народной Воли, 62/45, e-mail: kadt73@icloud.com)*

**Аннотация.** Меланин из лузги гречихи (*Fagopyrum esculentum*) можно рассматривать как один из перспективных пищевых микроингредиентов, имеющих потенциал для использования в производстве продуктов питания. В пищевой промышленности его можно использовать как натуральный краситель, эффективный сорбент тяжелых металлов, антиоксидант и защитный агент от воздействия ультрафиолетовой части спектра света. В качестве объектов исследования использовали порошки меланина из лузги гречихи посевной (урожаи 2021-2023 гг, Алтайский край). В результате исследования образцов порошка меланина на содержание общей золы и металлопримесей были установлены достоверные различия ($p < 0.05$) в содержании золы в зависимости от года сбора урожая. Низкие показатели микробиологической обсемененности образцов свидетельствуют о микробиологической чистоте используемого сырья и вспомогательных материалов, а также соблюдении санитарно-гигиенических требований на всех этапах жизненного цикла производства и хранения порошка меланина. При расчете параметров острой токсичности установлено, что при пероральном введении меланина мышам $LD_{50}$ составила 1193,5 мг/кг массы тела. С учетом коэффициент пересчета с мыши на человека составляет для человека массой тела 50-80 кг безопасная доза меланина в рационе составляет порядка 100 мг.

**Ключевые слова**: *Fagopyrum esculentum*, лузга гречихи, меланин, зола, микробиологическая обсемененность, токсичность по Керберу.

# CONFIRMATION OF THE SAFETY OF MELANIN ISOLATED FROM *FAGOPYRUM ESCULENTUM* HUSKS

© The Author(s) 2024

**URAZOVA Yana Valerievna,** postgraduate student, senior lecturer Department of Biotechnology
*Biysk Technological Institute (branch) Altai State Technical University*
*(659305, Russia, Biysk, Hero of the Soviet Union Trofimov Street, e-mail: urazova.iav@bti.secna.ru)*

**KADRITSKAYA Elena Aleksandrovna**, candidate of technical sciences,
director of the School of Hospitality and Service
*Ural State University of Economics*
*(620144, Russia, Yekaterinburg, 8 Marta/Narodnoy Voli Street, 62/45, e-mail: kadt73@icloud.com)*

**Abstract.** Melanin from buckwheat husk (Fagopyrum esculentum) can be considered as one of the promising food microingredients with potential for use in food production. In the food industry, it can be used as a natural dye, an effective sorbent of heavy metals, an antioxidant and a protective agent against the effects of the ultraviolet part of the light spectrum. Melanin powders from buckwheat husk (harvests of 2021-2023, Altai Krai) were used as objects of study. As a result of the study of melanin powder samples for the content of total ash and metal impurities, reliable differences ($p < 0.05$) in the ash content depending on the year of harvest were found. Low rates of microbiological contamination of the samples indicate the microbiological purity of the raw materials and auxiliary materials used, as well as compliance with sanitary and hygienic requirements at all stages of the life cycle of production and storage of melanin powder. When calculating the acute toxicity parameters, it was found that when melanin was administered orally to mice, LD50 was 1193.5 mg/kg body weight. Taking into account the conversion factor from mouse to human, for a human weighing 50-80 kg, the safe dose of melanin in the diet is about 100 mg.

**Keywords:** *Fagopyrum esculentum*, buckwheat husk, melanin, ash, microbiological contamination, Kerber toxicity.

*Для цитирования: Уразова Я.В. Подтверждение безопасности меланина, выделенного из лузги Fagopyrum Esculentum / Я.В. Уразова, Е.А. Кадрицкая // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 4(68). – С. 153-158. – EDN: ZSYDNF.*

**Введение**. В современном мире развитие пищевой промышленности связано с переходом на новый уровень, в том числе и в связи с созданием инновационных обогащенных продуктов питания (функциональных, с добавленной полезностью). Обогащение пищевых продуктов чаще всего осуществляется биологически активными веществами (БАВ), которые извлекаются из различных видов сырья. Внесение БАВ в состав пищевых систем и матриц позволяет осуществлять профилактику неинфекционных заболеваний, а также повышать иммунитет человека [1]. При этом в основе технологических решений производств обогащенных продуктов питания лежит концепция увеличения содержания функциональных пищевых ингредиентов до уровня, соотносимого с физиологическими нормами потребления (15-50 % от адекватного уровня потребления в сутки) [2].

За непродолжительное время ассортимент обогащенных пищевых товаров значительно увеличился, что обусловило рост спроса на безопасные и качественные ингредиенты. В связи с условиями экономического кризиса и введённых санкций на территорию Российской Федерации разработка и производство отечественных пищевых микроингредиентов становится актуальным и ключевым фактором для развития пищевой и перерабатывающей отрасли [3]. Существующая ситуация на рынке обуславливает необходимость оперативных решений в поиске инновационных методов для поддержания и роста производства отечественных пищевых микроингредиентов. Это включает переосмысление стратегий конкурентоспособности товаров и улучшение их качества, а также учет запросов и предпочтений потребителей [4, 5].

В сфере производства все чаще применяются пищевые микроингредиенты, которые фактически являются технологическими добавками и могут целенаправленно изменять характеристики продукции. Использование подобных добавок зачастую необходимо на протяжении всего технологического процесса. Таким образом, достижение продовольственной безопасности и организация производства качественных продуктов невозможны без использования пищевых микроингредиентов. Эти добавки могут быть использованы в самых различных продуктах – от напитков до кондитерских изделий. Основное направление использования микроингредиентов – это улучшение или регулирование вкуса, цвета, консистенции продуктов и увеличение сроков хранения. Вторичное направление использования микроингредиентов это удешевление продукции, наращивание объемов производства и повышение их доступности [3].

Основная задача при разработке новых пищевых ингредиентов – обязательное проведение испытаний безопасности с позиции гигиены, микробиологии и токсикологии. Результаты данных испытаний становятся объективной основой для возможности предприятиям пищевой промышленности подтверждать соблюдение норм и законов в области безопасности пищевых продуктов, а также позволяет сделать вывод о соответствии их деятельности установленным стандартам. Такие мероприятия по обеспечению безопасности сырья и пищевых ингредиентов играют ключевую роль в получении качественных и безопасных продуктов питания. Ключевым нормативным документом, определяющим требования по безопасности пищевых продуктов в нашей стране является Технический Регламент Таможенного Союза №021/2011, требования которого в том числе регулируют и производство продуктов питания, содержащие функциональные пищевые ингредиенты [6].

Меланин из лузги гречихи (*Fagopyrum esculentum*) можно рассматривать как один из перспективных пищевых микроингредиентов, имеющих потенциал для использования в производстве продуктов питания. В составе лузги гречихи посевной отмечается большое содержание ряда биологически активных веществ (БАВ), в числе которых витамины, минеральные вещества, полифенолы (в первую очередь рутин и кверцетин) [7-9]. Специфическим веществом, содержащемся в лузге гречихи является пигмент меланин, представляющий собой полимер нерегулярной структуры и обладающий широким спектром биологической активности [10-12].

Анализируя функциональную направленность меланина, в пищевой промышленности его можно использовать как натуральный краситель [13], эффективный сорбент тяжелых металлов [14], антиоксидант [15] и защитный агент от воздействия ультрафиолетовой части спектра света [12]. Так, в работе «Обоснование состава кондитерской глазури с меланином из гречневой лузги» авторы предлагают рассматривать меланин как перспективный ингредиент для замены части какао-порошка при производстве кондитерской глазури (Кадрицкая Е.А., Школьникова М.Н., Кокорева Л.А., Ялунина Е.Н., Рожнов Е.Д. // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022. – Т. 11, № 1(57). – С. 58-63). Так, использование порошка меланина в составе какао-содержащих пищевых систем позволяет заменять до 10-15% какао-порошка без существенного изменения цвета конечного продукта [16, 17]. Такая частичная замена какао-порошка в какао-содержащих пищевых системах возможна за счет коричневого цвета меланина, схожего с цветом самого какао-порошка – ценного пищевого ингредиента, полностью производимого

вне территории Российской Федерации. Одним из условий возможности использования порошка меланина как альтернативы какао-порошку является схожесть их гранулометрического состава: так в работе [18] приводятся данные о том, что средние размеры частиц порошка меланина составляют 15-45 мкм, что сопоставимо с частицами самого какао-порошка – 25-55 мкм.

Таким образом, меланин из лузги гречихи может выступать в качестве нового функционального пищевого ингредиента в составе пищевых систем. Однако, в доступной литературе крайне мало сведений о безопасности порошка меланина, что и обусловило цель настоящего исследования: исследовать микробиологическую, гигиеническую и фармакологическую безопасность порошка меланина и оценить возможности его использования в составе пищевых систем.

**Методология.** В качестве объектов исследования использовали порошки меланина из лузги гречихи посевной (урожаи 2021-2023 гг, Алтайский край), полученные в соответствии с [19] (образцы 1, 2 и 3). В образцах меланина определяли комплекс показателей, подтверждающих их безопасность:

– массовую долю общей золы и металломагнитной примеси: по ГОСТ 5901-81 Изделия кондитерские. Методы определения массовой доли золы и металломагнитной примеси;

– оценка микробиологической контаминации и содержание токсичных элементов определялось стандартными методами,на соответствие требованиям Приложений 2 ТР ТС 021/2011;

– исследование острой фармакологической токсичности выполнялось в соответствии с «Руководством по проведению доклинических исследований лекарственных средств» в ФГБНУ ВИЛАР.

Все экспериментальные исследования проводили в трехкратной повторности и представляли, как среднее значение ± стандартное отклонение. Для оценки изменений рассматриваемых показателей использовали однофакторный дисперсионный анализ (изучаемый фактор – год урожая), для сравнения средних значений ($p$<0,05) был использован апостериорный тест Тьюки. Статистическую обработку результатов исследований проводили с использованием пакета Statistica 10.

**Результаты**. В результате исследования образцов порошка меланина на содержание общей золы и металлопримесей были установлены достоверные различия в содержании золы в зависимости от года сбора урожая (табл. 1). Данный факт можно объяснить особенностями вегетации растения гречихи, в результате которого накапливаются минеральные вещества в лузге. Поскольку в технологии получения порошка меланина предусматривается стадия промывки лузги дистиллированной водой для освобождения от пыли и частиц земли, то оставшаяся после сжигания зола является следствием накопления минеральных веществ самим растением.

В таблице 2 представлены данные по содержанию токсичных элементов в опытных образцах меланина.

Незначительное содержание токсичных элементов в опытных образцах порошка меланина свидетельствует об удовлетворительном состоянии почв, на которых была выращена гречиха.

Результаты оценки микробиологической контаминации образцов меланина были определены в контролируемом эксперименте (табл. 3).

Изучение параметров острой токсичности осуществляли по Керберу. Визуализация исследования представлена на рисунке 1.

*Таблица 1 – Содержание золы и металломагнитных примесей в образцах меланина*

| Показатель | Образец 1 | Образец 2 | Образец 3 | Среднее за период изучения (2021-2023 гг) |
|---|---|---|---|---|
| Массовая доля золы, % | 4,1±0,3$^{bc}$ | 5,4±0,4$^{a}$ | 5,2±0,6$^{a}$ | 4,2±0,4 |
| Массовая доля металломагнитной примеси, % | – | – | – | – |

*Примечания: различия средних значений в строке с разными строчными буквами (a-c – по году урожая гречихи) существенны ($p < 0.05$); «–» – не обнаружено*

*Таблица 2 – Показатели гигиенической безопасности образцов меланина*

| Наименование показателя | Допустимые уровни, по ТР ТС 021/2011 | Образцы меланина | Среднее за период изучения (2021-2023 гг) | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | |
| Свинец, мг/кг, не более | 1,0000 | 0,2260±0,0024 | 0,3420±0,0020 | 0,2147±0,0018 | 0,2609±0,0021 |
| Мышьяк, мг/кг, не более | 1,0000 | 0,0016±0,0003$^{b}$ | 0,0024±0,0003$^{ac}$ | 0,0018±0,0002$^{c}$ | 0,0019±0,0003 |
| Кадмий, мг/кг, не более | 0,5000 | 0,0012±0,0001 | 0,0016±0,0001 | 0,0019±0,0001 | 0,0016±0,0001 |
| Ртуть, мг/кг, не более | 0,1000 | 0,0002±0,0001$^{b}$ | 0,0005±0,0001$^{ac}$ | 0,0002±0,0001$^{b}$ | 0,0003±0,0001 |

*Примечания: различия средних значений в строке с разными строчными буквами (a-c – по году урожая гречихи) существенны ($p < 0.05$)*

*Таблица 3 – Показатели микробиологической безопасности образцов меланина*

| Наименование показателя | | Допустимые уровни, по ТР ТС 021/2011 | Образцы меланина | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | №1 | №2 | №3 |
| Количество мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов, КМАФАнМ, КОЕ/г, не более | | $1\times10^5$ | $0{,}3\times10^5$ | $0{,}2\times10^5$ | $0{,}5\times10^5$ |
| Масса продукта (г), в которой не допускаются | Бактерии группы кишечной палочки, БГКП (колиформы) | 0,01 | не выделено | | |
| | Патогенные, в том числе Salmonella | 25 | не выделено | | |
| Дрожжи, КОЕ/г, не более | | 100 | Менее 5 | Менее 10 | Менее 20 |
| Плесени, КОЕ/г, не более | | 100 | Менее 5 | Менее 5 | Менее 10 |

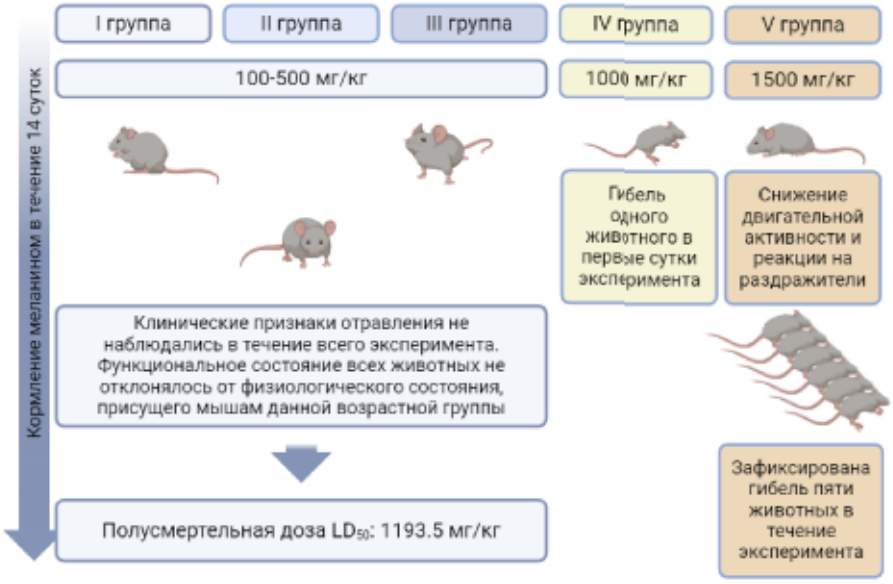



*Рисунок 1 – Визуализация исследования по определению острой токсичности меланина*

На основании рассчитанной полусмертельной дозы и с учетом коэффициента пересчета для мыши и человека (равен 11,8 [22]) было определено безопасное количество меланина в рационе человека весом 50-80 кг – 100 мг/сутки.

**Обсуждение.** Достаточно высокое содержание золы в исследуемых образцах меланина может быть опосредовано связано с сорбционными свойствами самого меланина, который способен вступать во взаимодействие с металлами, тем самым удерживая их за счет образования химических координационных связей, что, например, обсуждается в работе [21].

Из результатов, представленных в таблице 2 можно сделать вывод об отсутствии существенно значимого различия в содержании мышьяка в образцах 1 (урожай 2021 г) и 3 (урожай 2023 г), что можно связать с незначительным содержанием этого элемента в лузге. Аналогично, отсутствуют статистически значимые различия в содержании ртути за 2 года изучения. Это можно объяснить крайне незначительным содержанием этого элемента в образцах порошка меланина, сопоставимым с уровнем ошибки эксперимента.

Низкие показатели микробиологической обсемененности образцов свидетельствуют об отсутствии опасности микробиологической контаминации предлагаемым функциональным пищевым ингредиентом используемого сырья, вспомогательных материалов и готовой продукции, а также соблюдении санитарно-гигиенических требований на всех этапах жизненного цикла производства и хранения порошка меланина. Сохранению низкой обсемененности образцов способствует незначительная равновесная влажность порошка меланина (менее 5%), которая обусловлена отсутствием явления гигроскопичности.

В целом, использованный подход с определением токсичности пищевого ингредиента по методу Кербера достаточно часто используется при исследовании безопасности новых пищевых ингредиентов. Аналогичные исследования токсичности нового пищевого ингредиента были проведены в отношении масляной фракции пихты сибирской с использованием аутбредных мышей линии *CD-1* [23]. Результаты данного исследования свидетельствуют о том, что масляная фракция пихты сибирской, как и предлагаемый функциональный пищевой ингредиент меланин относится

к 3 классу опасности (умеренно опасные вещества) в соответствии с ГОСТ 12.1007-76. На основании определения токсичности авторы делают заключение о возможности использования масляной фракции пихты сибирской в качестве функционального микроингредиента, но лишь при строгом соблюдения установленных концентраций. Результаты данных исследований вновь подтверждают необходимость проведения дополнительных исследований токсикологических характеристик, включая анализ содержания тяжелых металлов, микробиологической чистоты, а также оценку острой токсичности и других связанных с перечисленными показателями аспектов.

В работе [24] рассматриваемая методология применена для оценки токсичности наноразмерного низкоэтерифицированного свекловичного пектина с использованием в качестве подопытных животных половозрелых крыс линии *Wistar*. Авторами показано, что в соответствии с ГОСТ 12.1007-76, рассматриваемый объект исследования относится к малоопасным веществам.

В дальнейшем определенное безопасное количество меланина в сутки необходимо учитывать при разработке пищевых систем с его использованием в качестве пищевого микроингредиента [25].

**Выводы.** На основании выполненных исследований были сделаны следующие выводы:

1) высокое содержание золы в исследуемых образцах меланина может быть опосредовано связано с сорбционными свойствами самого меланина, который способен вступать во взаимодействие с металлами, тем самым удерживая их за счет образования химических координационных связей;

2) незначительное содержание токсичных элементов в опытных образцах порошка меланина свидетельствует об удовлетворительном состоянии почв, на которых была выращена гречиха. Низкое содержание токсичных элементов в порошке меланина позволяет использовать его в составе пищевых систем;

3) низкая микробиологическая обсемененности образцов свидетельствуют о микробиологической чистоте используемого сырья и вспомогательных материалов, а также соблюдении санитарно-гигиенических требований на всех этапах жизненного цикла производства и хранения порошка меланина. Включение порошка меланина в состав пищевых систем минимально повлияет контаминацию сырьевых компонентов и микробиологическую стабильность продуктов питания;

4) на основании определения острой токсичности меланина по Керберу показано, что для человека массой тела 50-80 кг безопасная доза меланина в рационе составляет порядка 100 мг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Паймулина А.В., Потороко И.Ю., Науменко Н.В., Науменко Е.Е. Микроструктурирование пищевых ингредиентов для обеспечения их биодоступности в составе пищевых систем // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. – 2021. – № 9(1). – С. 15-23. – DOI 10.14529/food210102. – EDN XBUQSK.

2. Пастушкова Е.В., Заворохина Н.В., Вяткин А.В. Растительное сырье как источник функционально-пищевых ингредиентов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. – 2016. – № 4(4). – С. 105-113. – DOI 10.14529/food160412. – EDN XCNEOD.

3. Казанцева Е.Г., Лямкин И.И. Рынки микроингредиентов и их влияние на устойчивость продовольственных систем // Техника и технология пищевых производств. – 2023. – №53(1). – С. 202-216. – DOI 10.21603/2074-9414-2023-1-2424. – EDN HOCFYJ.

4. Асякина Л.К., Степанова Т.В., Тамарзина Т.В., Лосева А.И., Величкович Н.С. Российский рынок функциональных продуктов питания для здорового образа жизни человека // Социально-экономический и гуманитарный журнал. – 2022. – № 3(25). – С. 29-41. – DOI 10.36718/2500-1825-2022-3-29-41. – EDN EMRFLB.

5. Савенкова, Т.В. Российский рынок пищевых ингредиентов: состояние и перспективы развития / Т.В. Савенкова, П.А. Семенова // Пищевые ингредиенты в продуктах питания: от науки к технологиям: Монография / Под редакцией В.А. Тутельяна, А.П. Нечаева, М.Г. Балыхина. – 2-е издание, исправленное и дополненное. – Москва: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский государственный университет пищевых производств", 2021. – С. 238-267. – EDN TXPBVM.

6. Кочеткова А.А., Воробьева В.М., Воробьева И.С. [и др.] Мониторинг международных, межгосударственных и национальных документов в сфере технического регулирования качества и безопасности специализированных пищевых продуктов. Часть 3. Евразийский экономический союз, система стандартизации Российской Федерации // Пищевая промышленность. – 2018. – № 3. – С. 50-53. – EDN YRHSSE.

7. Chugunova, O. Shkolnikova M., Kadritskaya E. Buckwheat husk processing products as Factor of a Stable Food Market Development //E3S Web of Conferences, Yekaterinburg, 28-29 September 2020. Vol. 208. – Yekaterinburg: EDP Sciences, 2020. – P. 01009. – DOI 10.1051/e3sconf/202020801009. – EDN VGMMJJ.

8. Kuznetsova E., Uchasov D., Kuznetsova O., Kuznetsova E., Bychkova T., Brindza J. The use of high-performance liquid chromatography (HPLC) to assess the antioxidant activity of buckwheat husk and indicators of the oxidant-antioxidant system of laboratory animals //Proceedings of the International Scientific Conference-Digital Transformation on Manufacturing, Infrastructure and Service. – 2020. – Article: 3446497. – DOI 10.1145/3446434.3446497. – EDN VKROCG.

9. Kasar C., Thanushree M.P., Gupta S., Inamdar A.A. Milled fractions of common buckwheat (Fagopyrum esculentum) from the Himalayan regions: Grain characteristics, functional properties and nutrient composition // Journal of Food Science and Technology. – 2021. – Vol. 58. – P. 3871-3881.

10. Matseychik I.V., Korpacheva S.M., Lomovsky I.O., Serasutdinova K.R. Influence of buckwheat by-products on the antioxidant activity of functional desserts // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2021. – Vol. 640. – №. 2. – Article: 022038. – DOI 10.1088/1755-1315/640/2/022038. – EDN MJPPGS.

11. Lomovskiy I., Kiryanov A., Skripkina T. The Effect of Reverse Sorption on an Extraction Kinetics Melanin Case // Processes. – 2023. – Vol. 11. – №. 11. – Article: 3192. – DOI 10.3390/pr11113192. – EDN NWAIYG.

12. Zhang Z.L. et al. Bioactive compounds in functional buckwheat food //Food research international. – 2012. – V. 49. – №. 1. – P. 389-395. – DOI 10.1016/j.foodres.2012.07.035.

13. Aghajanyan A.E. et al. Development of the technology for producing water-soluble melanin from waste of vinary production and the study of its physicochemical properties // European Food Research and Technology. – 2022. – Vol. 248. – №. 2. – PP. 485-495.

14. Sivolobova N., Gracheva N., Zheltobryukhov V. Was-

tewater Treatment Using Plant Waste as Adsorbents //IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2019. – V. 272. – №. 3. – Article: 032012.

15. Sujka, K., Cacak-Pietrzak, G., Sulek, A., Murgrabia, K., Dziki, D. Buckwheat hull-enriched pasta: Physicochemical and sensory properties //Molecules. – 2022. – V. 27. – №. 13. – Article: 4065.

16. Рожнов Е.Д., Школьникова М.Н., Кадрицкая Е.А., Кокорева Л.А., Крюкова Е.В. Подходы к оценке характеристик цвета фитомеланина для использования в качестве альтернативы какао-порошка // Вестник КрасГАУ. – 2022. – № 2(179). – С. 209-216. – DOI 10.36718/1819-4036-2022-2-209-216. – EDN EGALPN.

17. Рожнов Е.Д., Школьникова М.Н., Кадрицкая Е.А., Арисов А.В. Экспрессный метод оценки цветовых характеристик какаосодержащих пищевых систем // Индустрия питания. – 2022. – Т. 7, № 4. – С. 44-49. – DOI 10.29141/2500-1922-2022-7-4-5. – EDN LYVCEK.

18. Школьникова М.Н., Рожнов Е.Д. Исследование гранулометрического состава образцов меланина //Пищевая биотехнология и продовольственная безопасность: Материалы X Международной научно-практической онлайн-конференции, Тюмень, 22 апреля 2022 года / Отв. редактор В.Г. Попов. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2022. – С. 151-154. – EDN VIFMTL.

19. Патент № 2780731 C1 Российская Федерация, МПК C09B 61/00. Способ выделения меланина из лузги гречихи: № 2021116176: заявл. 02.06.2021: опубл. 29.09.2022 / Я.В. Уразова, Е.Д. Рожнов, Л.А. Бахолдина [и др.]; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова". – EDN BMFFSY.

20. Руководство по проведению доклинических исследований лекарственных средств, часть первая / ФГБУ «НЦЭСМП» Минздравсоцразвития России. – Москва: Гриф и К, 2012. – 944 с.

21. Roy S., Rhim J.W. New insight into melanin for food packaging and biotechnology applications // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. – 2021. – V. 62. – №. 17. – P. 4629-4655 – DOI 10.1080/10408398.2021.1878097. – EDN TANXCW.

22. Гуськова Т.А. Доклиническое токсикологическое изучение лекарственных средств как гарантия безопасности проведения их клинических исследований // Токсикологический вестник. – 2010. – №. 5 (104). – P. 2-5.

23. Котова Т.В., Вальнюкова А.С., Федорова Ю.С., Худынцев К.А., Бхатия Н., Зорниченко Б.И. Скрининговые исследования химического состава, антибактериальной активности и острой токсичности масляной фракции пихты сибирской // Индустрия питания. – 2023. – Т. 8. – №. 2. – С. 93-104.

24. Алимжанов Н.Ю., Чакеев И.Ш., Жоробекова Ш.Ж., Кудайбергенова И.О., Лепшин Б.Н. Исследование острой токсичности наноразмерного свекловичного пектина // Казанский медицинский журнал. – 2015. – Т.96. – №2. – С. 208-213.

25. Матюшина А.В., Тошев А.Д. Общая характеристика семян пажитника и его полезные свойства в качестве функциональной добавки в продуктах питания // Вестник науки и образования. – 2023. – Т. 1. – №132(1). – С. 22-28.

*Статья поступила в редакцию 15.10.2024*
*Статья принята к публикации 13.12.2024*

УДК 663.911.15
EDN: XPRQTL

# СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ДЕЛИКАТЕСНЫХ МЯСНЫХ ПРОДУКТОВ

© Автор(ы) 2024

SPIN: 8809-4220
AuthorID: 278976
ORCID: 0000-0003-1671-0528
ResearcherID: H-1435-2018
ScopusID: 57212190361

**МОРГУНОВА Наталья Львовна,** кандидат сельскохозяйственных наук,
доцент кафедры «Технологии продуктов питания»
*Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова (410012, г. Саратов, пр-кт им. Петра Столыпина зд. 4, стр. 3, e-mail: morgunovanl@mail.ru)*

SPIN: 1195-7998
AuthorID: 727139
ORCID: 0000-0002-2700-3119
ResearcherID: CAE-9091-2022
ScopusID: 57214132767

**ФОМЕНКО Ольга Сергеевна,** кандидат технических наук,
доцент кафедры «Технологии продуктов питания»
*Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова (410012, г. Саратов, пр-кт им. Петра Столыпина зд. 4, стр. 3, e-mail: fomenkoos@mail.ru)*

SPIN: 6234-7568
AuthorID: 690248
ORCID: 0009-0005-2178-8591

**КИЗИЕВА Анна Сергеевна,** кандидат технических наук,
доцент кафедры «Технологии продуктов питания»
*Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова (410012, г. Саратов, пр-кт им. Петра Столыпина зд. 4, стр. 3, e-mail: nosowa88@yandex.ru )*

SPIN: 9219-0421
AuthorID: 1070660
ORCID: 0000-0003-4200-0896
ResearcherID: AHD-4170-2022
ScopusID: 57212193187

**СЕМИЛЕТ Никита Александрович,** кандидат технических наук,
доцент кафедры «Технологии продуктов питания»
*Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова (410012, г. Саратов, пр-кт им. Петра Столыпина зд. 4, стр. 3, e-mail: semiletna@yandex.ru)*

**Аннотация.** Применяемые технологические схемы производства деликатесных продуктов из баранины не отвечают требованиям экономической эффективности применения из-за длительности прохождения процессов посола мяса. Очевидна необходимость создания научно-обоснованных технологических операций, позволяющие сократить время производства деликатесных продуктов, в основе которых лежит такой технологически сложный вид сырья, как баранина. В статье научно обоснована эффективность применения ультразвука в процессе обработки мяса в рассоле. Установлено положительное влияние ультразвуковой обработки на процесс посола, на микроструктуру, физико-химические, органолептические показатели готового мясного продукта. Опытным путем определены оптимальные технологические режимы интенсивности ультразвуковой обработки мясного сырья. Доказано, что обработка ультразвуком в диапазоне низких частот от 20 до 35 кГц снижает рост колонии бактерий до 98 %, что говорит о выраженном бактерицидном эффекте. Гистологические исследования структуры контрольного и опытных образцов мяса баранины выявили, что воздействие ультразвука обладает деструктивными свойствами относительно мышечных волокон, способствует лучшему проникновению рассола вглубь ткани, что позволяет сократить длительность производственного процесса посола, при одновременном улучшении целого ряда основных показателей качества данного вида продукции.

**Ключевые слова:** технология, баранина, микроструктура, бактерицидность, микроорганизмы, посол, ультразвуковая обработка, качество, безопасность.

# IMPROVEMENT OF TECHNOLOGY FOR THE PRODUCTION OF DELICACY MEAT PRODUCTS

© The Author(s) 2024

**MORGUNOVA Natalia Lvovna,** candidate of agricultural sciences,

associate professor of the Department of Food Technology
*Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov*
*(410012, Saratov, ave. Peter Stolypin zd. 4, p. 3., e-mail:morgunovanl@mail.ru )*
**FOMENKO Olga Sergeevna,** candidate of technical sciences,
associate professor of the Department of Food Technology
*Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov*
*(410012, Saratov, ave. Peter Stolypin zd. 4, p. 3., e-mail: fomenkoos@mail.ru.)*
**KIZIEVA Anna Sergeevna,** candidate of technical sciences,
associate professor of the Department of Food Technology
*Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov*
*(410012, Saratov, ave. Peter Stolypin zd. 4, p. 3., e-mail: nosowa88@yandex.ru)*
**SEMILET Nikita Alexandrovich,** candidate of technical sciences,
associate professor of the Department of Food Technology
*Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov*
*(410012, Saratov, ave. Peter Stolypin zd. 4, p. 3, e-mail: semiletna@yandex.ru)*

**Abstract**. The applied technological schemes for the production of lamb delicacies do not meet the requirements of economic efficiency due to the duration of the meat salting processes. There is an obvious need to create scientifically based technological operations that allow reducing the production time of delicacies based on such a technologically complex type of raw material as lamb. The article scientifically substantiates the effectiveness of using ultrasound in the process of processing meat in brine. The positive effect of ultrasound on the salting process, on the microstructure, physicochemical, organoleptic indicators of the finished meat product has been established. Optimal technological modes of the intensity of ultrasonic processing of meat raw materials have been determined empirically. It has been proven that ultrasound treatment in the low frequency range from 20 to 35 kHz reduces the growth of bacterial colonies to 98%, which indicates a pronounced bactericidal effect. Histological studies of the structure of control and experimental samples of lamb meat revealed that the effect of ultrasound has destructive properties with respect to muscle fibers, promotes better penetration of brine deep into the tissue, which allows reducing the duration of the salting production process, while simultaneously improving a number of key quality indicators for this type of product.

**Keywords:** technology, mutton, microstructure, bactericidal activity, microorganisms, ambassador, ultrasonic treatment, quality, safety.

*Для цитирования: Моргунова Н.Л. Совершенствование технологии производства деликатесных мясных продуктов / Н.Л. Моргунова, О.С. Фоменко, А.С. Кизиева, Н.А. Семилет // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 4(68). – С. 159-165. – EDN: XPRQTL.*

**Введение.** Проблема питания является сложной и многогранной. Ее актуальность в России подтверждается активной государственной политикой. Это находит отражение в ряде вновь созданных документов, регламентирующих дальнейший вектор развития страны в этой области и государственных программ, таких как:

– «Стратегия формирования здорового образа жизни населения РФ на период до 2025 года»,

– «Стратегия повышения качества пищевой продукции в РФ до 2030 года»,

– «Стратегия формирования здорового образа жизни населения, профилактики и контроля неинфекционных заболеваний на период до 2025 года».

Научные исследования совместно с практическими инициативами производственных предприятий, акцентированные на вопросах продовольственной безопасности, здоровьесбережения, достижения экономически-выгодных параметров технологических процессов имеют одно из ключевых значений в обеспечении питанием населения, как России, так и мира. В настоящее время для решения задач в области питания разработан системный подход, отвечающий требованиям поиска оптимума взаимодействия науки, бизнес-сообщества и государства. Научные исследования стремятся разработать технологии создания новых продуктов питания, способствующих укреплению иммунных сил организма человека, повышению степени его сопротивляемости различным заболеваниям, эмоциональной стабильности, устойчивости к стрессу, повышению работоспособности и, как следствие, увеличению продолжительности жизни [3-5].

Одной из приоритетных задач в области пищевой промышленности является разработка и практическая реализация разного рода технологий, решающих вопрос дефицита белка. Ученые всего мира рассматривают технологические аспекты разработки новых и совершенствования существующих технологий с целью расширения ассортимента белоксодержащей продукции. Основным объектом исследования, несомненно, остается мясное сырье, в том числе и баранина. Существующие технологии ее промышленной переработки имеют ряд существенных недостатков, как с экономической точки зрения, так и с точки зрения позиции готового продукта в линейке потребительских предпочтений. Это связано с продолжительностью технологических процессов, а также со вкусо-ароматическими и

физическими свойствами сырья данного вида.

При производстве деликатесных продуктов из баранины основным процессом является посол. Длительность прохождения этого процесса не отвечает требованиям экономической целесообразности. В связи с этим очевидна необходимость создания научно-обоснованных технологических операций, позволяющих положительно влиять на время производства продуктов, сокращая время, и одновременно с этим, улучшать органолептические и физико-химические показатели качества конечного продукта, в основе которого лежит такой технологически сложный вид сырья, как баранина.

**Методология.** Цель исследования: совершенствование технологического процесса производства деликатесных продуктов из баранины посредством применения ультразвуковой обработки.

В задачи исследования входило:

– Исследование влияние ультразвука на развитие/подавление микроорганизмов.

– Изучение влияния ультразвука на микроструктуру мышечной ткани.

– Исследование ряда физико-химических показателей, таких как уровень *pH*, влагосвязывающая способность, активность воды, в исследуемых образцах продуктов после применения ультразвуковой обработки в процессе посола.

– Оценка органолептических характеристик готового продукта, произведенного с применением ультразвуковой обработки в технологии производства.

Объекты исследования:

– контрольный образец представлен охлажденной бараниной, выделенной из тазобедренной части, с традиционным ходом автолиза.

– опытный образец был выработан в результате интенсификации процесса посола охлажденной баранины посредством применения низкочастотных ультразвуковых волн.

Масса кусков составляла 300±50 г ($n = 6$). Рассол содержал соль поваренную (7%), сахар (1,5%) и нитрит натрия (0,015%). Плотность рассола составляла 1050 кг/м$^3$.

Исследование основано на стандартной системе методов, направленных на анализ органолептических характеристик, физико-химических, гистологических и микробиологических показателей качества исследуемых пищевых объектов. Эксперимент по ультразвуковому посолу мясного сырья из баранины проводился на базе ФГБОУ ВО Вавиловского университета (г. Саратов) в УНПК «Пищевик».

В работе были использованы установки (ванны) УОМ-2 и ПСБ – Галс (ультразвуковые установки с рабочей частотой колебаний 35 кГц) с интенсивностью ультразвука 1 Вт/см$^2$, а также ультразвуковой погружной излучатель (рабочая частота ультразвуковых колебаний 26 кГц), с интенсивностью ультразвука 1 Вт/см$^2$.

**Результаты.** Исследования в области возможности применения ультразвуковых волн в технологии продуктов питания актуально в России и мире. Научно обоснована его способность интенсификации различных технологических процессов, в том числе и процессов посола, за счет акустических колебаний. Существующие методы оптимизации времени посола мясного сырья носят характер значительного механического воздействия на продукт, что приводит к деструктивным изменениям в тканях сырья, и как следствие, снижению потребительских характеристик готовой продукции [11].

При воздействии ультразвука на микроорганизмы, находящиеся в жидкой среде, происходит образование кавитационных полостей в их цитоплазме. Эти полости заполняются парами жидкости, что вызывает разрушение цитоплазматических структур, обеспечивая бактерицидный эффект. Ультразвуковые колебания распространяются в жидкой среде, поэтому, с целью подтверждения бактерицидного эффекта ультразвуковой обработки, исследование микробиологических показателей проводили в воде, в которую принудительно были занесены штаммы бактерий: *Candida albicans, Exhericha coli, Bacillus subbillis, Staphilococcus aureus.*

Был проведен ряд опытов, различных по временным отрезкам воздействия. Наметившаяся тенденция позволила сделать вывод, что снижение частоты ультразвука оказывает более выраженный бактерицидный эффект. При двухминутном воздействии ультразвука 35 кГц колонии бактерий значительно сократились, однако, увеличение времени воздействия не привело к их полной ликвидации. Обработка ультразвуком 26 кГц вызвала значительное снижение числа колоний даже на этапе 30 секунд обработки.

Результаты микробиологических исследования образцов воды представлены в таблице 1.

*Таблица 1 – Результаты исследования степени подавления бактериальной микрофлоры воды, обработанной с помощью ультразвука, в сравнении с контрольными образцами*

| Бактерии | Подавление, % | |
|---|---|---|
| | 35 кГц, 2 минуты | 26 кГц, 1 минута |
| *Candida albicans* | - 33,30 | - 50,00 |
| *Exhericha coli* | - 43,80 | - 64,60 |
| *Bacillus subbillis* | - 46,80 | - 89,10 |
| *Staphilococcus aureus* | - 80,60 | - 86,80 |

На основании полученных данных можно сделать вывод, что время обработки также влияет на развитие микроорганизмов. Проведение обработки 26 кГц в течение 10 минут не дало 100% результат, но количество колоний бактерий снижалось до 90-98%.

Для изучения воздействия ультразвуковых волн на структуру мышечной ткани было проведено микроскопическое исследование образцов продукции. Процедура получения образцов проводилась в несколько этапов. На первом этапе производили фиксацию образцов 10%-ным водным раствором нейтрального формалина, затем произвели промывание с последующим обезвоживанием посредством использования спиртов возрастающей концентрации. Затем изготовили парафиновые блоки и нарезали на микротоме тканевые срезы. После чего провели депарафинирование полученных срезов и их окрашивание гематоксилин-эозиновым методом по Эрлиху [12].

Были приготовлены образцы, представленные в таблице 2. Результаты гистологических исследований представлены на рисунках 1-3.

На основании анализа данных гистологического исследования можно сделать вывод о том, что применение ультразвука сокращает время проникновения рассола вглубь мышечных волокон. Это обусловлено его способностью вызывать деструкцию мышечных волокон, в результате чего увеличивается количество поперечных микротрещин и щелей, что приводит к их фрагментации и локальным разрушениям сарколеммы [11].

Микроструктурные исследования гистосрезов мышечных волокон образцов показали, что применение ультразвука при обработке мясного сырья в рассоле оказывает деструктивное воздействие на волокна, способствует заполнению пространства между ними рассолом и ускорению проникновения соли вглубь мышечной ткани.

Влагоудерживающая способность (ВУС) белков мяса зависят от уровня *pH* сырья. Влагосвязывающая способность (ВСС) сырья имеет выраженный, подчиняющийся графической интерпретации характер *ВСС = f(pH)* [13]. Данные представлены на рисунке 4.

Результаты физико-химических исследований подтвердили наличие такого рода зависимости (табл. 3).

Анализ показателей общей кислотности (*pH*) водных вытяжек мышечной ткани контрольных и опытных образцов показал их увеличение. Это связано с применением ультразвука, в результате которого происходит активация рассола и его усиленное проникновение в опытные образцы. Помимо этого, было доказано, что с увеличением времени обработки ультразвуком влажность продукта неизменно возрастает, что отражается на изменении массы исследуемых образцов в сторону ее увеличения.

С целью оценки потенциальных сроков хранения и реализации был проведен анализ показателя активности воды (табл. 4).

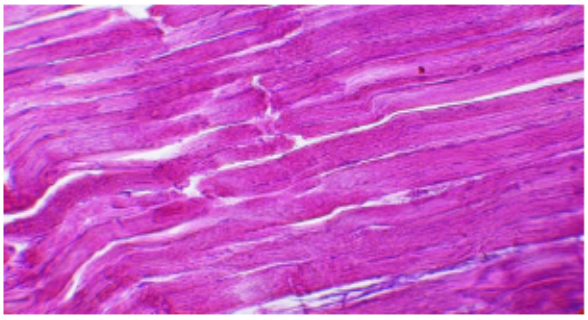


*Рисунок №1 – Образец 1. Увеличение × 300, прямолинейно-волнообразное расположение мышечных волокон, наличие незначительных повреждений и рваных трещин*

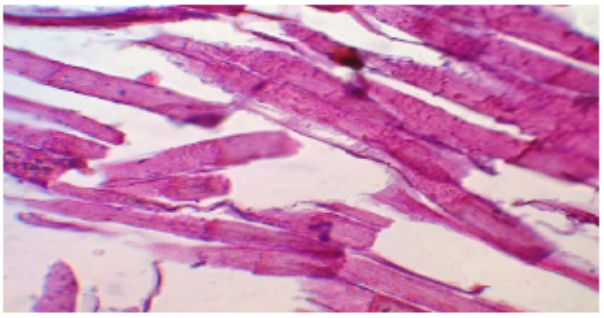


*Рисунок 2 – Образец №2. Увеличение × 300, деструкция мышечных волокон, складчатость сарколеммы, выраженное разрыхление и набухание мышечных волокон*

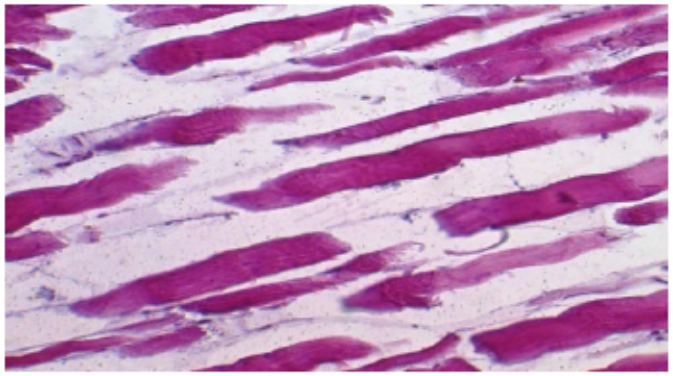


*Рисунок 3 – Образец №3. Увеличение × 300, выраженное разволокнение и деструкция мышечных волокон с возникновением между ними больших полостей, волнообразное расположение волокон*

*Таблица 2 – Образцы исследований*

| Номер образца | Описание образца |
|---|---|
| №1 | баранья корейка, с традиционным ходом процесса самопроизвольного изменения химического состава, структуры и свойств мясного сырья после убоя животного под воздействием собственных ферментов мяса (автолизом) |
| №2 | баранья корейка после моркого посола (5 часов), |
| №3 | баранья корейка, которая подвергалась посолу с использованием ультразвукового облучения (26 кГц, 5 часов). |

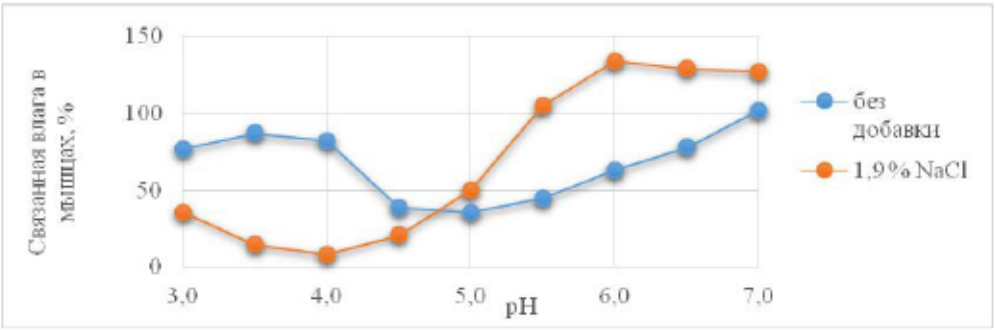



*Рисунок 4 – Зависимость влагосвязывающей способности мышечной ткани от величины pH*

*Таблица 3 – Результаты физико-химических исследований исследуемых образцов*

| Исследуемый показатель | Баранья корейка: стандартный процесс посола | Баранья корейка: УЗ посол в течение 1 часа 35 кГц, 5,7 л | Баранья корейка: УЗ посол в течение 2 часов 35 кГц, 1,3 л | Баранья корейка: УЗ посол в течение 3 часов 26 кГц, 3 л |
|---|---|---|---|---|
| pH | 6,37±0,011 | 6,60±0,028 | 6,97±0,15 | 7,03±0,043 |
| ВСС, % к общей влаге | 96,85±0,28 | 95,68±0,65 | 86,58±0,65 | 83,18±0,31 |

*Таблица 4 – Результаты исследований активности воды исследуемых образцов*

| Исследуемый показатель | Баранья корейка: стандартный процесс посола | Баранья корейка: УЗ посол в течение 1 часа 35 кГц, 5,7 л | Баранья корейка: УЗ посол в течение 2 часов 35 кГц, 1,3 л | Баранья корейка: УЗ посол в течение 3 часов 26 кГц, 3 л |
|---|---|---|---|---|
| Активность воды Aw | 0,9864±0,0011 | 0,9755±0,0009 | 0,9692±0,001 | 0,9649±0,0012 |

Доказано, что чем ниже *Aw*, тем выше показатели качества продукта [14]. В исследованиях выявили линейное снижение данного показателя, что коррелировало с увеличением времени обработки в ультразвуковом поле.

Воздействие ультразвука уже с 1 часа значительно изменяло физико-химические показателя мяса, что возможно использовать в производстве других изделий из баранины. Процесс обработки более 12 часов способствовал размягчению структуры мяса и худшим органолептическим показателям.

В ходе дальнейших исследований, с учетом зависимости показателей качества и органолептических характеристик продукта от времени воздействия ультразвука, произвели выработку копчено-вареных продуктов из баранины после 6, 8, 10 и 12 часов ультразвукового посола.

**Обсуждение.** Опираясь на данные исследований, изложенных выше, а также с учетом органолептических исследований образцов, доведенных до состояния кулинарной готовности, можно сделать вывод, что наилучшими характеристиками обладает образец, подверженный 12-ти часовому воздействию ультразвука (26 кГц). Таким образом, по результатам исследований можно сделать вывод, что обработка с частотой ультразвука 26 кГц и интенсивностью ультразвукового поля 1 Вт/см$^2$, обладает способностью в значительной степени интенсифицировать процесса посола мяса баранины.

Время посола баранины при производстве деликатесных изделий является одной из составляющих процесса. Длительный процесс посола не только увеличивает производственные затраты, но и ограничивает производственные мощности предприятия. Существующие технологии посола баранины для деликатесной продукции требуют оптимизации. Учеными был найден ряд решения в области модификация традиционных методов посола путем применения вакуумных технологий, использования инъекционных растворов, примене-

ния электростимуляции мяса перед посолом [15-21]. Особый интерес для производства представляют разработки новых барьерных технологий, связанных с использование высокочастотной обработки, применением ферментов, использованием нанотехнологий.

В ходе исследования были проведены эксперименты по совершенствованию технологии производства деликатесных мясных продуктов, которые были направлены на изучение таких аспектов технологического процесса, как:

– развитие патогенной микрофлоры продкции из баранины;

– изменение микроструктуры мышечной ткани мяса баранины;

– физико-химические показателей (уровень *pH*, влагосвязывающая способность, активность воды);

– органолептические характеристики готового продукта.

Предложенный способ производства деликатесных продуктов из баранины с использованием ультразвуковой обработки представляет собой технологическую цепочку операций, которая позволяет учесть необходимость сокращения времени посола, обеспечить высокое качество конечного продукта за счет улучшения органолептических показателей и показателей безопасности.

**Выводы.** В работе была доказана эффективность и целесообразность применения ультразвуковой обработки в технологии производства деликатесной продукции из баранины. Было установлено, что обработка ультразвуком в диапазоне низких частот от 20 до 35 кГц снижает рост колонии бактерий до 98%, что говорит о выраженном бактерицидном эффекте.

Гистологические исследования структуры контрольного и опытных образцов мяса баранины выявили, что воздействие ультразвука обладает деструктивными свойствами относительно мышечных волокон, способствуя лучшему проникновению рассола вглубь ткани.

На основании комплекса показателей качества, включающих в себя как органолептические, так и физико-химические. Был произведен поиск оптимальных значений частоты ультразвука (26 кГц) и определение опытным путем длительности посола мясного сырья из баранины (12 ч). Так как процесс производства деликатесных изделий по стандартным схемам посола занимает от двух суток и более, то ускорение посола ультразвуком имеет положительный экономический эффект. Расчет экономической эффективности производства копчено-вареных деликатесной продукции из баранины показал, что отпускная цена 1 кг опытного образца дешевле контрольного на 25 руб., в связи с сокращением времени технологического процесса.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Приказ Министерства здравоохранения РФ от 15 января 2020 г. N 8 «Об утверждении Стратегии формирования здорового образа жизни населения, профилактики и контроля неинфекционных заболеваний на период до 2025 года» – URL:https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/73421912/.

2. Стратегия повышения качества пищевой продукции в РФ до 2030 года – URL:https://mcx.gov.ru/upload/iblock/0df/0dfdc143e5ac3a0c05b71da426447764.pdf.

3. Инновационные подходы к разработке технологий производства, хранения и переработки продукции растениеводческого кластера: материалы конференции / под редакцией В.А. Бабушкина. – Воронеж: Мичуринский ГАУ, 2020. – 319 с. – ISBN 978-5-94664-418-1. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: https://e.lanbook.com/book/157858.

4. Инновационные технологии в АПК: материалы конференции / под общей редакцией В.А. Бабушкина. – Воронеж: Мичуринский ГАУ, 2018. – 353 с. – ISBN 978-5-94664-386-3. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: https://e.lanbook.com/book/157811.

5. Фатьянов, Е.В. К вопросу анализа общего химического состава мясного сырья / Е.В. Фатьянов, С.А. Сидоров // Вестник мясного скотоводства. – 2015. – № 3 (91). – С. 75-78.

6. Елисеева, Л.Г. Экспертиза и товароведение однородных групп продовольственных товаров: учебник / Л.Г. Елисеева. – 6-е изд., перераб. и доп. – Москва: Дашков и К, 2024. – 886 с. – ISBN 978-5-394-05428-0.

7. Потороко, И.Ю. Исследование кинетических закономерностей посола мяса птицы с использованием кавитационно активированных жидких сред / И.Ю. Потороко, Л.А. Цирульниченко // Прикладная биохимия и биотехнологии. – 2014. – №3. – Том 2. – С. 21-28.

8. Пищевые ингредиенты в продуктах питания: от науки к технологиям: монография / под редакцией В.А. Тутельяна [и др.]. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: МГУПП, 2021. – 664 с. – ISBN 978-5-9920-0377-2. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: https://e.lanbook.com/book/277136.

9. Буяров, В.С. Технологические и экономические аспекты производства продукции животноводства и птицеводства: монография / В.С. Буяров, К.А. Лещуков, А.В. Буяров. – Орел: ОрелГАУ, 2022. – 198 с. – ISBN 978-5-93382-373-5. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: https://e.lanbook.com/book/322109.

10. Владимиров, Н.И. Основы первичной переработки сельскохозяйственных животных и птицы: учебное пособие /Н.И. Владимиров, А.И. Яшкин, В.В. Горшков. – Барнаул: АГАУ, 2024. – 227 с. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: https://e.lanbook.com/book/422108.

11. Ракина, М.С. Гистология: Основы гистологии: учебное пособие / М.С. Ракина; составитель М.С. Ракина. – Кемерово: Кузбасская ГСХА, 2017. – 52 с. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: https://e.lanbook.com/book/143004.

12. Alarcon-Rojo, A.D. Power ultrasound in meat processing / A.D. Alarcon-Rojo, H. Janacua, J.C. Rodriguez, L. Panini, T.J. Mason // Meat Science. – 2015. – Vol. 107. – P. 86-93.

13. Amal Sudaraka Samarasinghe, H.G., Dharmaprema, S., Manodya, U., Kariyawasam, K.P. and Samaranayake, G.B., 2024. Effect studies on ultrasound and combined treatments on food quality: A comprehensive review. Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology. 12, 2 (February 2024), 349-365.

14. Aslam R., Alam M.S., Kaur J., Panayampadan A.S., Dar O.I., Kotakota A. and Pandiselvam R. (2022). Understanding the effect of ultrasonic treatment on the texture and rheological properties of food products. Journal of Texture Research, 53(6), 775-799. https://doi.org/10.1111/jtxs.12644.

15. Beitia, E., Gkogka, E., Chanos, P., Hertel, S., Heinz, V., Valdramidis, V., & Aganovich, K. (2023). Disinfection of microorganisms using ultrasound-based food processing technologies and model systems: an overview. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 22(4), 2802-2849. https://doi.org/10.1111/1541-4337.13163.

16. Bermudez-Aguirre, D., Mobbs, T., & Barbosa-Canovas, G.V. (2011). The use of ultrasound in the food industry. Ultrasonic technologies for food and bio-processing, 65-105. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7472-3_3.

17. Bhargava N., Mohr R.S., Kumar K. and Sharanagat V.S.

(2021). Achievements in the field of ultrasound application in the food industry: an overview. Ultrasonic Sonochemistry, 70, 105293. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105293.

18. Bhat, Z.F., Morton, J.D., Kumar, S., Bhat, H.F., Adil, R.M. and Behit, A.E.D.A. (2022). Ultrasound as a new technology for processing food products of animal origin: Emphasis on protein digestibility in vitro. Trends in Food Science and Technology, 124, 309-322. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.04.012.

19. Cao H., Cai K., Wang Yu. and Zheng H. (2019). The effect of ultrasonic treatment on physico-chemical parameters, antioxidants and the color of bay juice. Journal of Food Quality, Volume 2019, Article number 7917419, 12 pages. https://doi.org/10.1155/2019/7917419.

20. Chavan P., Sharma P., Sharma S.R., Mittal T.K. and Jaiswal A.K. (2022). The use of high-intensity ultrasound to improve the efficiency of food processing: an overview. Foods, 11(1), 122. https://doi.org/10.3390/foods11010122.

21. Muthukrishnan, Y., Sunial, K.K., and Rawson, A. (2022). Powerful ultrasound: a green technology for food processing. In Food Processing and Preservation Technology (1st ed., p. 31). Apple Academic Press. E-book ISBN: 9781003153184.

*Статья поступила в редакцию 07.10.2024*
*Статья принята к публикации 13.12.2024*

УДК 637.52
EDN: ZRJQCH

# АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ НАПРАВЛЕНИЙ В ТЕХНОЛОГИИ МАРИНОВАНИЯ МЯСНЫХ ПРОДУКТОВ

© 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: 4629-1238
AuthorID: 652714
ORCID: 0000-0001-9831-3635
**ПАНКРАТЬЕВА Наталья 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: pankratieva@usue.ru)*

SPIN: 9129-0294
AuthorID: 783653
ORCID: 0000-0003-0514-9413
**МЫСАКОВ Денис Сергеевич,** кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии питания Института менеджмента, предпринимательства и инжиниринга
*Уральский государственный экономический университет*
*(620144, Екатеринбург, ул. 8 Марта, д. 62, e-mail: Mysakov_ds@usue.ru)*

**Аннотация.** Для переработчиков важной задачей стоит поиск новых технологических решений, связанных с переработкой мяса, и внедрение на предприятиях современных подходов по использованию пищевых ингредиентов. Разрабатываемые продукты должны не только удовлетворять потребителя сбалансированным составом с точки зрения пищевой ценности, но и соответствовать по органолептическим показателям традиционным продуктам из мяса птицы, говядины, свинины. Решение поставленной задачи связано во многом с применением разнообразных маринадов. При разработке маринадов для мясных продуктов основной задачей является формирование улучшенного органолептического профиля. В статье рассмотрены основные тренды и инновации в технологии маринования мясных продуктов с использованием маринадов. Даны основные преимущества использования вкусоароматических композиций и функциональных смесей, разработанных для маринования мяса. Чтобы определить влияние различных растворов для маринада на вкусовые и морфологические характеристики различных видов мяса, включая свинину, говядину, конину и птицу, была проведена серия экспериментов. Однако для оптимизации методов маринования было проведено всего несколько исследований, которые требуют дальнейшего изучения.

**Ключевые слова:** мясо, маринование, метод инъекций, иммерсионный метод, влагоудерживающая способность.

# ANALYSIS OF MODERN TRENDS IN TECHNOLOGY OF MARINATION OF MEAT PRODUCTS

© 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*
*(620144, Yekaterinburg, 8 Marta str., 62, e-mail: chugun.ova@yandex.ru)*
**STEPNEVA Ekaterina Vitalievna,** graduate student
*Ural Economic State University*
*(620144, Ekaterinburg, 8 Marta St., 62, e-mail: ekaterina.foxes@gmail.com)*

**PANKRATIEVA Natalia Anatolyevna,** candidate of technical sciences, associate professor of the Department of Nutrition Technology of Institute of Management, Entrepreneurship and Engineering
*Ural State University of Economics*
*(620144, Yekaterinburg, ul. 8 Marta, 62, e-mail: pankratieva@usue.ru)*
**MYSAKOV Denis Sergeevich,** candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of Food Technology of Institute of Management, Entrepreneurship and Engineering
*Ural State University of Economics*
*(620144, Yekaterinburg, ul. 8 Marta, 62, e-mail: Mysakov_ds@usue.ru)*

**Abstract.** An important task for processors is to find new technological solutions related to meat processing and to implement modern approaches to the use of food ingredients at enterprises. The developed products should not only satisfy the consumer with a balanced composition in terms of nutritional value, but also correspond in organoleptic indicators to traditional products made from poultry, beef, and pork. The solution to this problem is largely associated with the use of various marinades. When developing marinades for meat products, the main task is to form an improved organoleptic profile. The article discusses the main trends and innovations in the technology of marinating meat products using marinades. The main advantages of using flavor compositions and functional mixtures developed for marinating meat are given. A series of experiments were conducted to determine the effect of various marinade solutions on the taste and morphological characteristics of various types of meat, including pork, beef, horse meat, and poultry. However, only a few studies have been conducted to optimize marinating methods, which require further study.

**Keywords:** meat, marinating, injection method, immersion method, water-holding capacity.

*Для цитирования: Чугунова О.В. Анализ современных направлений в технологии маринования мясных продуктов / О.В. Чугунова, Е.В. Степнева, Н.А. Пакратьева, Д.С. Мысаков // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 4(68). – С. 166-173. – EDN: ZRJQCH.*

**Введение.** Производство пищевых продуктов часто можно рассматривать в виде целенаправленного комбинирования свойств сырьевых материалов и параметров технологического процесса, подбор которых определяет качественные и потребительские показатели получаемой продукции [1, 3]. Практика использования различных категорий ингредиентов для маринования уже давно распространена в мясной промышленности. Мясо и мясопродукты, обработанные различными ингредиентами для маринования, как отдельно, так и в сочетании с несколькими способами маринования, могут улучшить цвет, вкус и нежность, а также увеличить срок их хранения за счет уменьшения роста патогенных микроорганизмов и окисления липидов. Целью данного обзора является поиск и анализ научной литературы, освещающей состояние современных исследований по маринованию мяса различных видов.

Маринование – это технология обработки мяса, включающая погружение в приготовленные с приправами жидкие маринады, которые могут содержать различные добавки, такие как кислоты, ферменты и пряности и приправы [2, 3, 5]. Это также способ смягчения мяса с использованием биологических, химических и физических методов. Например, мясо обрабатывают различными видами биологических маринадов, таких как кефир, йогурт, сливочное и растительное масло [2, 20], розмарин, куркума, корень имбиря, листья лемонграсса, карри [2, 20], перец чили, перец черный, чеснок [2, 20]. Для улучшения свойств мяса при мариновании используются различные химические соединения, в том числе лимонная кислота, уксусная кислота, винная кислота, яблочный уксус, вино, хлорид натрия ($NaCl$), нитрит натрия ($NaNO_2$) и бикарбонат натрия ($NaHCO_3$) [3].

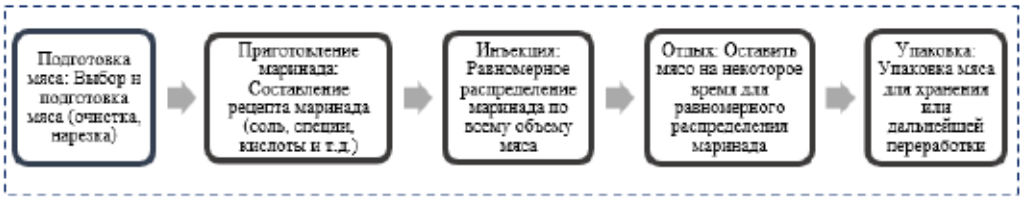
Многочисленные научные исследования продемонстрировали важную роль функциональных пищевых ингредиентов для маринования, таких как полифенолы, в проявлении различных полезных свойств, включая противовоспалительное, антибактериальное, противоаллергическое, антитромботическое, гепатопротекторное, противовирусное, кардиопротекторное, антиканцерогенное и сосудорасширяющее действие [1, 6]. Например, добавление соевого соуса улучшает физико-химические свойства, такие как цветовые параметры, текстурные свойства, эффективность маринования, приготовления и влагоудерживающую способность мяса. Это связано с экстракцией белка и снижением *pH* мышечного белка [ 2, 5]. Маринад с апельсиновым маслом и тимьяном – это антибактериальное средство для маринования, которое уменьшает количество кампилобактерий и сальмонелл энтеритидис, обеспечивая безопасность и качество мяса [2]. Пиво, орегано, петрушка, горчица, соль, перец, чеснок, оливковое масло, уксус и растворы для маринада из свежего лука действуют как антиоксиданты в процессе маринования [3]. Соответственно, травы и специи, добавляемые в маринады, существенно улучшают качество мяса и влияют на здоровье, контролируя или сводя к минимуму окисление липидов [1].

После маринования мясо упаковывается и хранится без термической обработки, обеспечивая высокое качество продукта. Таким образом, маринады в процессе маринования мяса значительно повышают его сохранность.

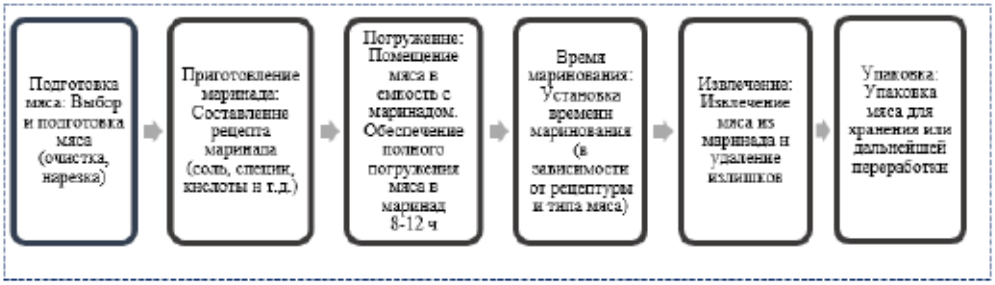
**Методология.** Процедура маринования занимает много времени, от нескольких часов до нескольких дней. Кроме того, этот метод не позволяет обеспечить регулярное и адекватное распределение веществ. Для

решения этих проблем используются новые методы маринования (рис. 1), такие как инъекция, погружение в раствор и перемешивание [3, 4].

*Метод инъекций* является наиболее широко используемым методом, поскольку он позволяет точно дозировать маринад, обеспечивая консистенцию продукта без потери времени при погружении. Зонды или иглы вводятся в кусок мяса или мясопродукта, и маринад вводится по мере извлечения игл или шприцев, распределяя маринад по всему продукту [5-7]. Так же обнаружено, что приготовление куриных грудок методом погружения приводит к увеличению усвоения маринада на 8%. Это было связано с механическим способом инъекции перед погружением мяса в маринад, что, возможно, было связано с усиленным разложением мышечного белка и, следовательно, с повышенной впитываемостью маринада. Эти исследователи также обнаружили, что, несмотря на более высокую впитываемость маринада, метод инъекции может привести к большим потерям при приготовлении. Процесс впрыскивания может привести к образованию отверстий в мясе, что может привести к протечкам во время приготовления, что приведет к снижению влагоудерживающей способности и увеличению потерь при приготовлении и продувке [3].




*а)*




*б)*




*в)*

*Рисунок 1 – Особенности методов маринования мясного сырья:*
*а) метод инъекций; в) иммерсионный метод (погружение); в) обваливание (перемешивание)*

*Иммерсионный метод* (погружение) – это традиционная технология, которая заключается в замачивании мяса в маринаде, позволяющая приправам проникать в мясо с течением времени за счет диффузии. Это наиболее экономичный способ маринования, не требующий специального оборудования. Процесс включает погружение субстрата в водный раствор и выдержку мяса в этом растворе в течение 8-12 часов [8]. Однако этот метод не идеален для мясной промышленности, поскольку при нем не обеспечивается равномерность распределения ингредиентов и он непрактичен из-за длительного времени обработки и ограниченного количества маринада, которое может быть использовано [1, 8]. Однако этот недостаток можно преодолеть, добавляя в маринады смягчающие вещества, такие как ферменты и кислоты [8]. Авторы обнаружили, что маринование куриных бедер без костей и кожи в течение 8 часов повышает выход готового продукта, влагоудерживающую способность, *pH* (кислотность) и мягкость мяса, одновременно снижая потери влаги при приготовлении. Мякоть куриных бедер, маринованная методом погружения, в наибольшей степени улучшает изучаемые физико-химические показатели по сравнению с методами инъекции и обваливания. Результаты сенсорного анализа показали, что участники дегустации отдавали предпочтение мясу, которое мариновалось

методом инъекции в течение 8 часов. В отличие от этого, обнаружено, что метод погружения снижает уровень *pH*, цвет и впитываемость маринада [7]. При использовании этого метода исследователи не уделяли особого внимания нежности мяса. У них была возможность оценить этот параметр в сочетании с различными маринадами. Кроме того, было проведено много исследований о влиянии различных методов маринования на вкусовые качества мяса куриной грудки [6, 7]. Обваливание (перемешивание) – механический процесс, включающий вращение, падение и соприкосновение с внутренними стенками и лопастями контейнера. Авторы определяют его как сложную физическую и механическую систему, которая возникает во вращающихся барабанах с перегородками [8]. Во время этого процесса куски мяса захватываются перегородками и помещаются в барабан. Перегородки создают силу тяжести, трения, давления и экструзии, которые передаются на куски мяса, что приводит к деформации мышечной структуры. Это способствует лучшему усвоению маринада, отделению белков и повышению качества готового продукта. Кроме того, это обеспечивает равномерный цвет вяленого мяса. Было доказано, что обваливание в сочетании со специальными добавками снижает скорость окисления липидов в мясе. Томление куриных окорочков и грудки в вакууме в течение 2 часов привело к значительному увеличению влагоудерживающей способности, усвояемости маринада, выхода готового продукта, содержания золы и влаги, а также к заметному снижению показателей разжевываемости, твердости, клейкости. До 12-го дня после охлаждения все продукты были микробиологически безопасны. Исследование полезно для производителей мяса, поскольку для производства маринованных мясных продуктов вместо обычного маринования можно использовать вакуумное обваливание (2 часа с маринадом). Они проанализировали пищевые компоненты и обнаружили более высокое содержание белка и меньшее содержание жира в этом способе приготовления маринада.

**Результаты.** Использование маринадов в качестве эффективного консерванта при мариновании является старейшей и наиболее распространенной практикой в мясной промышленности. Это улучшает вкус, сохраняет влагу, улучшает текстуру, подавляет рост бактерий и увеличивает выход конечных продуктов [8, 9]. Его постоянно применяют в мясной промышленности, поскольку он легко растворяется в воде, а ионная сила воды быстро возрастает. Различные виды мяса содержат около 70% влаги, в то время как жидкость в мышечной ткани обладает меньшей ионной силой, чем раствор для маринада. Маринад легко усваивается мясом и мясопродуктами посредством осмотических процессов до достижения равновесия [7]. Функциональные ингредиенты растительного и животного происхождения, включая добавки, используются в маринадах для придания конечным продуктам различных функциональных свойств. Основными функциями, которые выполняют функциональные ингредиенты в маринадах, являются их связующие свойства, которые улучшают адгезию. При приготовлении мяса и мясопродуктов важными факторами являются изменение текстуры (повышение нежности), содержание жира и влагоудерживающая способность. Кроме того, затраты на рецептуру можно снизить, добавляя воду в мясо и мясопродукты, повышая производительность или используя недорогие ингредиенты.

Мясное сырье используется в различных рецептурах продуктов [2, 3]. Миофибриллярные белки играют важную роль в определении текстурных свойств и влагоудерживающей способности мяса и мясопродуктов. Эти белки могут влиять на то, насколько эффективно маринады улучшают вкусовые качества мяса. Актин и миозин, входящие в состав миофибрилл, в наибольшей степени способствуют формированию желеобразных свойств мяса и мясопродуктов. Миозиновый желатин приводит к образованию трехмерной сетчатой структуры, которая удерживает воду в менее подвижном состоянии. Электростатическое отталкивание увеличивает расстояние между толстыми и тонкими волокнами, открывая больше мест для связывания воды. Увеличение расстояния между волокнами также увеличивает количество воды, удерживаемой мышцами. Эта вода называется свободной и связана стерическим эффектом. Кроме того, этот процесс приводит к проникновению маринадов или воды в сарколемму, что приводит к набуханию миофибрилл, что приводит к растворению и экстракции миофибриллярных белков. Эти растворимые белки смешиваются с саркоплазматической жидкостью, повышая концентрацию белка и создавая белковую матрицу для удержания воды. В результате этого процесса на поверхности продуктов также образуется вязкое покрытие, которое защищает их от потери воды во время хранения. В большинстве видов мяса сохраняется свободная вода, а маринование в растворе для маринада улучшает вкус и аромат за счет вытягивания жидкости из мяса и впитывания маринада в мышечную структуру. Соль за счет осмоса вытягивает жидкость из мяса, и раствор для маринада впитывается, пока мышцы разлагаются. Раствор содержит водорастворимые ароматизаторы, такие как чеснок, которые усваиваются мышцами и придают мясу общий аромат. А также лук, который находится под поверхностью мяса. Масла также помогают переносить различные жирорастворимые вкусовые оттенки различных приправ, таких как чили, травы и специи, на поверхность мяса [5, 6]. Исследований о том, как маринады влияют на цвет, питательные вещества или биологические компоненты при мариновании, не проводилось.

Использование маринадов при мариновании мяса оказывает значительное влияние на качество мяса.

Вкусовые качества являются важными сен-

сорными характеристиками мяса, которые могут в значительной степени влиять на восприятие потребителями и выбор мяса [7]. Добавление пряностей и ароматизаторов – одна из стратегий, позволяющих удовлетворить потребность потребителя в разнообразии, новых вкусах, пряностях и превосходном товарном виде, а также способствующих повышению ценности продуктов, заключается в процессе маринования. Ароматизаторы и пряности, добавляемые во время маринования, улучшают вкус мясных продуктов за счет усиления основного аромата, восстановления аромата, утраченного в процессе обработки, создания отличительного вкусового профиля, а также подавления и нейтрализации избыточного аромата [5] подчеркивают важность молочнокислых бактерий (*LAB*), которые влияют на вкус маринованного мяса. При добавлении большего количества *LAB* участники дегустатации могли бы ощутить более кислый вкус. Молочнокислая ферментация по-прежнему остается одним из самых популярных методов консервирования и переработки пищевых продуктов, поскольку она недорогая, требует мало энергии и придает продукту разнообразные вкусовые качества. Продуцирование молочной кислоты оказывает непосредственное влияние на вкусовые качества продуктов, придавая им мягкую кислинку и облегчая процесс отверждения. Что требует снижения *pH*, синтеза небольших количеств этанола, уксусной кислоты, ацетоина, диоксида углерода и пировиноградной кислоты, а также их способности вызывать образование ароматических соединений, влияет на вкусовые качества ферментированного вяленого мяса буйволов. Авторы обнаружили, что менее чем 21% потребителей не нравится вкус мяса грудки бройлера без костей, маринованного с 1%-ной солью *NaCl*, но они были обеспокоены тем, что использование 1%-ной концентрации соли может вызвать у потребителей неприязнь к продукту, особенно если в нем присутствуют другие добавки или соли, или даже то и другое вместе [7-9]. Используется при переработке конечного продукта. Следует отметить, что вкус мяса и мясопродуктов улучшается после биологического маринования. Большинство экспериментов привели к такому выводу, хотя было проведено относительно немного исследований по улучшению вкуса с использованием химических маринадов и различных методов маринования. Цвет мяса – одна из важнейших качественных характеристик, влияющих на потребительскую приемлемость, и важнейший показатель качества мяса, используемого в кулинарии и смежных отраслях. Исследователи [3-5] провели эксперименты с аналогичными молочными продуктами (кефиром, йогуртом и пахтой) и обнаружили, что тип маринада и температура приготовления су-вида не влияют на желтизну и светлоту, но усиливают покраснение. Кисломолочные продукты ограничивают окисление миоглобина, повышают термостойкость, уменьшают покраснение и минимизируют его вариации. Однако исследователи не изучали микробиологические характеристики, вкусовые качества или процессы окисления. Изменение этих параметров происходит под влиянием молочных продуктов. Необходимы дополнительные исследования для оптимизации процесса маринования мяса в йогурте и пахте, а также для выбора способа приготовления су-вида [9]. Авторы использовали растворы для маринования образцов мяса. Готовые блюда, приготовленные из мясных аналогов и говядины, которые были маринованы (с пивом и терияки), были приготовлены в виде суфле при разных температурах (70°C и 80°C) и в течение разного времени (60, 90 и 120 минут для говядины и 90, 120 и 150 минут для аналога говядины) [9]. Что касается легкости, то на образцы говядины существенное влияние оказала взаимосвязь между температурой приготовления и типом маринада. С другой стороны, образцы, маринованные в пиве, имели более низкие значения цветности, в то время как аналоги мяса, обмакнутые в соус терияки, имели более низкие значения. Тип маринада также влияет на насыщенность цвета. Кроме того, исследователи подчеркнули, что продукты-аналоги мяса являются жизнеспособной альтернативой мясным продуктам и открывают новые бизнес-возможности для их использования при разработке продуктов. В исследовании были эксперименты с добавлением соли (*NaCl*) в раствор для маринования и использовали ультразвуковое исследование (УЗИ) [10]. Параметры цвета увеличивались при увеличении концентрации *NaCl* в растворе для маринада и использовании ультразвука. Возможно, причиной этого эффекта является кавитация. Изменения в цветовых характеристиках образцов мяса кролика. Этот процесс приводит к образованию свободных радикалов и окислению липидов или белков во время обработки УЗИ. Маринованная куриная грудка в соевом соусе, которая оказалась менее легкой и из-за окраски соевого соуса наблюдалось усиление желтизны и покраснения. Авторы использовали три типа растворов для маринада: 7,7% *NaCl* (S), 2,3% $NaO_3P_2$ (P) и 2,3% $NaHCO_3$ (B) [10]. За исключением образцов *P*, все образцы после маринования приобрели более темный цвет по сравнению с контрольными. Наиболее насыщенный цвет наблюдался у образцов, маринованных с использованием комбинации солей (*SP, SB* и *SPB*). Что касается цвета приготовленного мяса, то маринованные образцы с сочетаниями компонентов были темнее, чем контрольные, хотя яркость в группах S, P и B не отличалась от таковой в контрольной группе. Маринование, по-видимому, оказывает некоторое влияние на покраснение и желтизну кожи, однако эти эффекты не всегда последовательны или значительны.

**Обсуждение.** Влагоудерживающая способность – еще один важный показатель качества мяса. На это в значительной степени влияют pH, способ маринования и тип маринада. Мясо 32-дневного бройлера мариновали в обычном маринаде, содержащем перец

чили, чеснок, мускатный орех, имбирь и соль, в течение 4, 8 и 12 часов при температуре 4°C, используя четыре способа маринования (немаринованный вариант, погружение, инъекции и обваливание) [9]. Несмотря на то, что в процессе инъекции в образцы вводилось фиксированное количество смеси для маринования, мясо, маринованное методом инъекции, имело более низкую вязкость, чем мясо, маринованное методом обваливания. Причина более низкой влагоудерживающей способности мяса, маринованного в течение 4 и 8 часов, до сих пор неизвестна. Одно из возможных объяснений заключается в том, что метод инъекции вызвал чрезмерную потерю влаги из-за пор на поверхности мякоти, образовавшихся во время инъекции. Авторы обнаружили, что влагоудерживающая способность мяса уменьшается по мере увеличения концентрации *NaCl* в маринаде и при использовании ультразвука. Снижение содержания хлорида натрия в образцах без применения ультразвука было более значительным (в среднем на 8,1%), чем в образцах с применением ультразвука (в среднем на 6,2%). Наибольшие потери воды наблюдались при концентрации *NaCl* 200 г/л. Эти результаты связаны с сильным кавитационным эффектом. Созданные явления вызывают разрушение клеток и, следовательно, большую миграцию влаги из тканей. Исследователи отметили, что куриное мясо, маринованное в соке красной свеклы, не оказывает заметного влияния на влагоудерживающую способность, но двухчасовое перемешивание в вакууме увеличивает влагоудерживающую способность грудинки из-за более высокого содержания белка по сравнению с мясом окорочков [9].

Авторы использовали соевый соус для маринования куриных грудок и сообщили, что снижение *pH* не повлияло на состав благодаря повышенной растворимости коллагена [10]. Аналогичным образом, авторы не обнаружили влияния маринования мяса буйвола с $CaCl_2$ на влагоудерживающую способность [7, 9]. Напротив, исследователи отметили, что pH отрицательно влияет на влагоудерживающую способность в образцах говядины [10]. В другом исследовании использовали наноцеллюлозу и целлюлозу помело альбедо в качестве водосвязывающих веществ. В системе для маринования мяса использование целлюлозы без соли улучшило влагоудерживающую способность на 65,14%. Это намного больше, чем улучшение, наблюдаемое при использовании наноцеллюлозы, которое составило 63,28%. Кроме того, добавление соли в процесс маринования повысило коэффициент полезного действия, при этом самые высокие показатели были достигнуты в образцах целлюлозы, изготовленных на коммерческой основе, за которыми следовали образцы экстрагированной целлюлозы – 81,34% и 78,70% соответственно. Авторы обнаружили, что оптимальным способом маринования курицы является смесь хлорида натрия, триполифосфата натрия и лимонной кислоты при температуре 4°C в течение 2 часов, при котором достигается наивысшее значение влагоудерживающей способости [9, 11]. Таким образом, соль играет важную роль в результатах этих исследований. Многие исследователи отмечали увеличение влагоудерживающей способности после использования *LAB* и пробиотиков. Например, исследователи ферментировали свинину в *LAB* в течение 24 часов и наблюдали снижение влагоудерживающей способности в маринованных образцах. Аналогичным образом, в другом исследовании также отмечено улучшение качества мяса после использования этих методов.

Время маринования является важным фактором при оценке качества мяса. В исследовании описано, что с увеличением времени маринования качество мяса увеличивается более быстрыми темпами. Средние значения влагоудерживающей способности составило 30,8%, 32,4% и 35,6%, соответственно, после 0, 3 и 24 часов хранения.

Нежность мяса во многом зависит от его органолептических и качественных характеристик. Нежность является важнейшим компонентом качества пищевых продуктов. Изменения в нежности могут повлиять на решения потребителей о покупке, и они могут захотеть платить больше за нежное и сочное мясо. Маринады могут существенно повлиять на сочность и нежность мяса. Обнаружено, что *P. acidilactici KTU05-7* и *P. pentosaceus KTU05-9* являются наиболее подходящими бактериями для ферментации для маринования свиного мяса, чтобы придать ему нежность. В другом исследовании указано, низкая концентрация раствора бикарбоната натрия (0,2 ммоль/л) и ультразвук (20 кГц и 350 Вт) повышают нежность мяса куриной грудки [7, 11]. Короткая продолжительность маринования в 24 часа позволяет достичь высокого уровня удержания влаги.

Наибольшую нежность говяжьим стейкам придает использование 25%-ного сока спаржи и сока с добавлением 10%-ного бальзамического уксуса. Маринадный раствор, сочетающий бальзамический уксус и сок спаржи, можно использовать в соусах и специях для придания нежности жестким говяжьим стейкам [5, 18]. Нежность мяса буйвола можно улучшить, замариновав его в 0,5% растворе гидроксида аммония [7, 16]. Приправа к стейкам из длинного грудного мяса буйвола с содержанием хлорида кальция (5% по массе) после наступления трупного окоченения является многообещающей мерой, о чем свидетельствует заметное увеличение нежности, которая увеличилась на 53,4% у стейков с приправами по сравнению с 35,5% у стейков без приправы [10]. Обнаружено, что маринование стейков в кисломолочных продуктах снижает их жесткость. Наименьшая жесткость была отмечена у стейков, маринованных в йогурте и пахте в течение 6 или 9 дней и приготовленных при температуре 60°C. Аналогичным образом, обнаружено снижение жесткости свиных филейных частей после их маринования в пахте или йогурте [10, 17, 18]. А компания Pakdeecha-

nuan сообщила, что лучшим способом маринования цыплят является приготовление смеси из 5% *NaCl*, 1% триполифосфата натрия (*STPP*) и 0,02% лимонной кислоты при температуре 4°C в течение 2 часов, что обеспечивает очень мягкую текстуру. Авторы отметили незначительное повышение нежности говядины после маринования мяса слабыми органическими кислотами [10, 17-20]. Так же указано, что масла холодного отжима и ароматические травы могут быть эффективны для улучшения нежности говядины породы блэк-Ангус после длительного маринования.

Маринование значительно влияет на питательный состав, но исследования в этой области все еще продолжаются. Была дана оценка влияния экстрактов лаврового листа на маринованные куриные грудки и ножки, используя высокочастотное размораживание при температуре 225°C в течение 12 минут 20 секунд и перегретый пар при температуре 223°C 8 минут 40 секунд. Несмотря на то, что в ходе исследования был выявлен сбалансированный состав полиненасыщенных и насыщенных жирных кислот, а также более высокий уровень жира, белка, калорий и холестерина, результаты в первую очередь были сосредоточены на питательном составе различных частей куриного тела. С другой стороны, согласно исследованию, йогурт, кефир и пахта не повлияли на содержание белка или влаги в маринованной свиной корейке, но значительно снизили количество жира, образующегося в результате окисления жира [10, 17-19]. Согласно исследованию, маринование говядины в экстрактах красного вина привело к усвояемости жидкости в среднем примерно на 1%, без существенных изменений в зависимости от обработки. Обработка не оказала никакого влияния на общий состав мышц, и все они имели статистически идентичный уровень влажности (77,5%), золы (1,1%), белков (16,5%) и общего количества липидов (2,9%). В отличие от этого, в маринованных окорочках и грудинках содержание золы, влаги и белка было ниже, чем в других частях птицы. Результаты этого исследования показали, что использование сока красной свеклы при вакуумном перемешивании значительно повысило содержание золы и влаги в мясе по сравнению с контролем. Маринад и вакуумное перемешивание также улучшают усвоение маринада, что приводит к повышению содержания золы и влаги в обработанном мясе. Обнаружено, увеличение содержания белка в вяленом мясе буйволов, маринованном в 0,5% растворе *LAB* в течение 12 часов, при снижении содержания жира [2, 4, 20]. Содержание белка, жира и золы в куриных тортиках, маринованных в лимоне и имбире, было ниже, чем в контрольной группе. Содержание белка в лимонной и контрольной группах составило 28,1% и 32% соответственно, в то время как содержание жира составило 6,7% и 10,1% в лимонной и контрольной группах, а содержание золы составило 1,6% и 2,4% в обеих группах. Вероятной причиной этих различий было вымывание саркоплазматических выделений во время маринования. Был проведен анализ снижения содержания этих питательных веществ в растворах для маринования. Питательные параметры в основном анализировались в экспериментах с биологическими маринадами, и результаты варьировались в зависимости от различных маринадов. Помимо улучшения качества мяса, маринады полезны для здоровья человека с точки зрения целого ряда проблем со здоровьем. Они обладают различными свойствами, которые приносят пользу людям.

**Выводы.** Потребители становятся все более осведомленными о проблемах, связанных с питанием, и стараются улучшить свой рацион с пользой для здоровья. Поэтому маринование мяса и мясопродуктов - хорошая идея, поскольку оно помогает снизить уровень холестерина за счет уменьшения содержания жира в мясе. Маринады, содержащие большое количество фенольных соединений, могут помочь снизить уровень перекиси водорода, уменьшить образование вторичных продуктов окисления липидов и сохранить вещества, реагирующие с 2-тиобарбитуровой кислотой, практически неизменными при хранении. Добавление в маринад мягких органических кислот, таких как лимонный сок, помогает снизить синтез полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) в мясе на 70%. Полифенольные антиоксиданты также могут ингибировать образование гетероциклических аминов (ГЦА) на 100%. Эти данные свидетельствуют о том, что маринование оказывает положительное влияние на здоровье человека. В заключение, в этом обзоре представлена информация о маринадах и их пользе для исследователей и научных работников. Из этого обзора следует, что биологические маринады играют важную роль во всех аспектах процесса маринования мяса, включая безопасность мяса, срок его хранения и здоровье человека. Другие виды маринадов не имеют срока годности и определенных параметров, связанных с состоянием человека (окисление липидов, вещества, реагирующие с 2-тиобарбитуровой кислотой, канцерогенные и мутагенные соединения), к которым исследователи должны относиться серьезно. Кроме того, становятся популярными такие передовые технологии, как импульсная вакуумная упаковка, микроперфорация $CO_2$, ультразвуковая обработка и обработка под высоким давлением, которые потенциально могут повысить производительность. Хотя эти технологии оказывают ограниченное влияние на органолептический и микробиологический анализ, они все же могут существенно повлиять на вкус, цвет, влагоудерживающую способность и нежность продукта. Некоторые эксперименты показали противоречивые результаты в отношении этих параметров при использовании различных видов маринадов и методов маринования. С другой стороны, одним из распространенных методов маринования является обваливание, которое весьма эффективно в мясной промышленности для сокращения времени

маринования и улучшения цвета, вкуса и текстуры мяса.

Потребительский спрос на органические продукты в качестве противомикробных добавок в процессе маринования мяса с годами возрос. Поэтому особое внимание следует уделять использованию местных недорогих натуральных ингредиентов. Кроме того, нанотехнологии стали передовой альтернативой, которая быстро внедряется в цепочки производства мяса для обеспечения более длительного срока хранения, улучшения прослеживаемости и безопасности, а также улучшения вкусовых качеств. Многие исследователи обратили особое внимание на наночастицы растительного происхождения, такие как волокна сои, овса, льняного семени, мякоть яблока, цитрусовые волокна и перец/паприка, которые повышают эффективность маринада. Эффективность продуктов и, следовательно, их антибактериальное и антиоксидантное действие улучшаются благодаря нанотехнологиям при мариновании мяса. Хотя это недавнее новшество, необходимы дополнительные исследования по использованию биоактивных наночастиц, синтезированных экологически чистым способом, для повышения потребительской привлекательности.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Исследование процесса нагревания мяса кур в механических и термических операциях с использованием модельных тел / М.Н. Смагина, А.Л. Желудков, Д.А. Смагин, С.В. Акуленко // Индустрия питания. – 2023. – Т. 8, № 4. – С. 98-108. – DOI 10.29141/2500-1922-2023-8-4-10. – EDN XTDPFG.

2. Калужских, А.Г. Разработка рецептур и технологии производства маринадной продукции из мяса / А.Г. Калужских, И.С. Калиновский, В.С. Щербаков // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. – 2022. – № 3. – С. 110-119. – DOI 10.24412/2311-6447-2022-3-110-119. – EDN TDAPFQ.

3. 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.

4. Miklyashevski, P. Производство мясных полуфабрикатов по инновационным технологиям / P. Miklyashevski, В.В. Прянишников, В.В. Колыхалова // Инновационные технологии в пищевой промышленности: наука, образование и производство: Международная научно-техническая конференция (заочная), Воронеж, 03-04 декабря 2013 года / Под общей редакцией Пономарева А.Н., Мельниковой Е.И.. – Воронеж: Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2013. – С. 37-42. – EDN TDCYLZ.

5. Ермохин, А.В. Производство мясных полуфабрикатов по инновационным технологиям / А.В. Ермохин, Н.В. Губанова // В мире научных открытий: материалы V Всероссийской студенческой научной конференции (с международным участием), Ульяновск, 19-20 мая 2016 года. Том II. – Ульяновск: Ульяновская государственная сельскохозяйственная академия имени П.А. Столыпина, 2016. – С. 98-100. – EDN WJEYAZ.

6. Никитин, А.В. Инновации в производстве рубленых полуфабрикатов / А.В. Никитин // В мире научных открытий: Материалы международной студенческой научной конференции, Ульяновск, 23-25 мая 2017 года. Том V. Часть 2. – Ульяновск: Ульяновский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, 2017. – С. 162-164. – EDN ZGEADB.

7. Юрк Н.А. Современные тенденции в производстве мясных полуфабрикатов функциональной направленности / Н.А. Юрк, И.В. Власов // Современный взгляд на будущее науки: сборник статей международной научно-практической конференции: в 3 частях, Пермь, 25 октября 2016 года. Том Часть 2. – Пермь: Общество с ограниченной ответственностью "Аэтерна", 2016. – С. 92-94. – EDN WWLDJR.

8. Еманов, С.Н. Инновации и тренды в технологии маринования мясных продуктов / С.Н. Еманов, А.П. Корж // Мясная индустрия. – 2023. – № 3. – С. 16-23. – DOI 10.37861/2618-8252-2023-03-16-23. – EDN MXUTHL.

9. 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. – EDN HIKVLX.

10. Степнева, Е.В. Особенности использования маринадов для мясных полуфабрикатов / Е.В. Степнева, О.В. Чугунова, Л.А. Кокорева // Промышленность и сельское хозяйство. – 2024. – № 5(70). – С. 46-56. – EDN IOFHRO.

11. Смагина М.Н., Желудков А.Л., Смагин Д.А., Акуленко С.В. Исследование процесса нагревания мяса кур в механических и термических операциях с использованием модельных тел // Индустрия питания|Food Industry. 2023. Т. 8, № 4. С. 98-108. DOI: 10.29141/2500-1922-2023-8-4-10. EDN: XTDPFG.

12. Бурова, Т.Е. Маринады для мяса птицы на основе молочной сыворотки / Т.Е. Бурова // Инновации в технологии продуктов здорового питания: Международная научная конференция: материалы, Калининград, 26 мая 2016 года / И.М. Титова (отв. ред.). – Калининград: ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет», 2016. – С. 74-80. – EDN XFBMPN.

13. Прянишников, В.В. Маринады для мяса - просто и эффективно / В.В. Прянишников, В.В. Колыхалова, Д.В. Лазько // Мясная индустрия. – 2015. – № 4. – С. 41. – EDN TZEVCD.

14. Кашапова, Г.С. Использование пряностей и приправ в составе различных маринадов при разработке рецептуры мясных рулетов / Г.С. Кашапова // World Science: problems and innovations: сборник статей XXXI Международной научно-практической конференции : в 4 ч., Пенза, 30 мая 2019 года. Том Часть 2. – Пенза: "Наука и Просвещение" (ИП Гуляев Г.Ю.), 2019. – С. 44-46. – EDN FXEDPG.

15. Мельник, Е.В. Разработка рецептур маринадов на основе молочной сыворотки для мяса утки / Е. В. Мельник // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО: Материалы XLVI научной и учебно-методической конференции, Санкт-Петербург, 31 января – 03 2017 года. Том 1. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2017. – С. 199-202. – EDN XVDXSH.

16. АРиВА: наши новые добавки. Готовимся к летнему сезону: представляем самые популярные маринады // Мясная индустрия. – 2024. – № 5. – С. 12-13. – EDN CSDXYZ.

17. Боровков, Я.Е. Маринование и его влияние на безопасность мяса и здоровье человека / Я.Е. Боровков, Д.И. Фролов // Инновационная техника и технология. – 2023. – Т. 10, № 1. – С. 7-12. – EDN JAWLHE.

18. Меретукова, Ф.Н. Исследование показателей качества полуфабрикатов из мяса индейки, приготовленных по технологии су-вид / Ф.Н. Меретукова, Н.В. Абрегова // Новые технологии. – 2021. – Т. 17, № 2. – С. 48-55. – DOI 10.47370/2072-0920-2021-17-2-48-55. – EDN RENJEC.

19. Iqbal S.Z., Talib N.H., Hasnol N.D.S. (2016). Heterocyclic aromatic amines in deep fried lamb meat: the influence of spices marination and sensory quality // Journal of Food Science and Technology. – 53 (3). – 1411-1417.

20. Benhammou N., Bekkara F.A., Kadifkova Panovska T. (2009). Antioxidant activity of methanolic extracts and some bioactive compounds of Atriplex halimus // Comptes Rendus Chimie. – 12 (12). – 1259-1266.

*Статья поступила в редакцию 17.10.2024*
*Статья принята к публикации 13.12.2024*

УДК 664.3: 665.117:
EDN: AOZFZY

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КИСЛОТНОЙ ЭКСТРАКЦИИ БЕЛКОВ ИЗ ЖМЫХА РАПСА

© Автор(ы) 2024

SPIN: 9200-9527
AuthorID: 1138909
ORCID: 0000-0002-3842-1391

**ДЕГТЯРЕВ Иван Александрович**, аспирант
*Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)*
*(125080, Россия, Москва, Волоколамское шоссе, 11, e-mail: Ivand152@yandex.ru)*

SPIN: 5861-2838
AuthorID: 1116815
ORCID: 0000-0003-2478-1705

**ФОМЕНКО Иван Андреевич**, кандидат технических наук,
доцент кафедры биотехнологии и биоорганического синтеза
*Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)*
*(125080, Россия, Москва, Волоколамское шоссе, 11, e-mail: iv.fomenko@mail.ru)*

SPIN: 1732-9580
AuthorID: 1192694
ORCID: 0009-0000-7677-6583

**АЛЕКСАНОЧКИН Денис Игоревич**, магистр
*Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)*
*(125080, Россия, Москва, Волоколамское шоссе, 11, e-mail: aleksanochkindi@list.ru)*

**Аннотация.** В последнее время особое внимание уделяется белкам рапса в контексте использования их в качестве пищевой добавки. Традиционно белок получают щелочной экстракцией с последующим осаждением в изоэлектрической точке, однако при таком способе теряется до 25% белка. Рапс уникален тем, что содержит белки с разными молекулярными массами и различными значениями изоэлектрических точек, что обеспечивает высокую растворимость белков в кислой среде. Целью исследования являлось определение параметров получения белкового концентрата, полученного водной экстракцией в кислой среде, и изучении его функционально-технологических свойств. Рапсовый жмых обезжиривали с помощью н-гексана. Экстракцию белка осуществляли в течение 15-90 мин, гидромодуле 1:5-1:25, температуре 20-60°С и уровне *pH* 2,0-6,0. Изоляцию белка проводили при значениях pH 7,0-10,0 с помощью 20% раствора *NaOH*. Экстракция жира н-гексаном при соотношении сырье-экстрагент 1:5, температуре 40°С в течение 2,0 ч позволяет снизить его содержание до 2%. Дальнейшая экстракция белка при гидромодуле 1:10, значении *pH* 4,0, температуре 40°С и длительности экстракции 60 мин с последующей изоляцией при *pH* 7,0 позволяет получить белковый концентрат с содержанием целевого продукта 78,63±1,96% и с выходом 20,68% от общего содержания белка в сырье. Белковый концентрат представлен преимущественно напином с молекулярной массой менее 20 кДа и круциферином, имеющего молекулярную массу около 27-30 кДа и 40-45 кДа. Концентрат белка рапса имеет высокие значения водосвязывающей способности (4,85 г воды/г препарата) и жиросвязывающей способности (2,30 г масла/г препарата).

**Ключевые слова:** рапс, жмых, кислотная экстракция белка, напин, круциферин, белковый концентрат, обезжиривание, электрофорез, функционально-технологические свойства, пищевая промышленность.

# INVESTIGATION OF THE PROCESS OF ACID EXTRACTION OF PROTEINS FROM RAPESEED CAKE

© The Authors 2024

**DEGTYAREV Ivan Alexandrovich**, postgraduate student
*Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH)*
*(125080, Russia, Moscow, 11 Volokolamsk Highway, e-mail: Ivand152@yandex.ru)*

**FOMENKO Ivan Andreevich,** candidate of technical sciences,
associate professor of the Department of biotechnology and bioorganic synthesis
*Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH)*
*(125080, Russia, Moscow, 11 Volokolamsk Highway, e-mail: iv.fomenko@mail.ru)*

**ALEKSANOCHKIN Denis Igorevich**, master's student
*Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH)*
*(125080, Russia, Moscow, 11 Volokolamsk Highway, e-mail: aleksanochkindi@list.ru)*

**Abstract.** Recently, special attention has been paid to rapeseed proteins in the context of their use as a food additive. Traditionally, protein is obtained by alkaline extraction followed by precipitation at the isoelectric point, but this method results in a loss of up to 25% of the protein. Rapeseed is unique in that it contains proteins with different molecular weights and different isoelectric points, which ensures high solubility of proteins in an acidic medium. The aim of the

study was to determine the parameters for obtaining protein concentrate obtained by aqueous extraction in an acidic medium and to study its functional and technological properties. Rapeseed cake was defatted using n-hexane. Protein extraction was carried out for 15-90 min, with a hydromodulus of 1:5-1:25, a temperature of 20-60 °C and a *pH* of 2.0-6.0. Protein isolation was carried out at pH values of 7.0-10.0 using a 20% *NaOH* solution. Extraction of fat with n-hexane at a raw material-to-extractant ratio of 1:5 and a temperature of 40 °C for 2.0 h makes it possible to reduce its content to 2%. Further extraction of protein at a hydromodulus of 1:10, a *pH* of 4.0, a temperature of 40 °C and an extraction duration of 60 min, followed by isolation at a *pH* of 7.0 makes it possible to obtain a protein concentrate with a target product content of 78.63±1.96% and a yield of 20.68% of the total protein content in the raw material. The protein concentrate is represented mainly by napine with a molecular weight of less than 20 kDa and cruciferin with a molecular weight of about 27-30 kDa and 40-45 kDa. Rapeseed protein concentrate has high values of water-binding capacity (4.85 g water/g of preparation) and fat-binding capacity (2.30 g oil/g of preparation).

**Keywords:** rapeseed, cake, acid extraction of protein, napin, cruciferin, protein concentrate, degreasing, electrophoresis, functional and technological properties, food industry.

*Для цитирования: Дегтярев И.А. Исследование процесса кислотной экстракции белков из жмыха рапса / И.А. Дегтярев, И.А. Фоменко, Д.И. Алексаночкин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 4(68). – С. 174-181. – EDN: AOZFZY.*

**Введение.** Рапс – это ярко-желтое цветущее растение, принадлежащее к семейству *Brassicaceae*. Его возделывают во многих странах, объем производства во всем мире с 2022 по 2023 составляет 87,3 млн тонн [1]. В России посевы рапса в последние годы стабильно увеличиваются. В 2022 году посевные площади составили 2341,2 тыс. га, из которых на долю ярового пришлось 1763,7 тыс. га [2]. Рапсовое масло является третьим по объему производства в мире после пальмового и соевого [3].

В современных производствах, масло получают путем прессования, в связи с чем образуется большое количество отходов в виде жмыха, который является перспективным сырьем для дальнейшей переработки [4]. Обычно образуются два вида рапсового жмыха, в зависимости от содержания жира, оставшегося после прессования. Жмых полного отжима получают путем полной выжимки масла до содержания жира 5-10%, а жмых предварительного отжима получают путем извлечения масла в меньшей степени, в результате чего содержание жира составляет 15-18% [5]. Жмых рапса характеризуется сбалансированным аминокислотным профилем с высоким содержанием незаменимых аминокислот, таких как метионин и цистеин [6]. Благодаря перечисленным преимуществам жмых имеет потенциал для использования в качестве сырья для производства антиоксидантов, ароматических соединений и продуктов питания благодаря высокому содержанию белка, полифенолов и клетчатки. Жмых содержит около 30-40% «сырого» протеина и 15-20% лигнина [7]. Полифенолы, содержащиеся в рапсовом отходе, обладают антиоксидантным и противовоспалительным действиями, что может способствовать профилактике хронических заболеваний, таких как рак и сердечно-сосудистые заболевания [8]. Ценный в пищевом отношении компонентный состав рапсового жмыха свидетельствует о его высоком потенциале в качестве сырья пищевого назначения. Сдерживающими факторами введения растительного отхода в состав продуктов питания является присутствие нежелательных вкусовых и ароматических компонентов, а также грубой клетчатки [9]. Для повышения пищевой ценности белка рапса целесообразно осуществлять фракционирование сопутствующих компонентов, таких как белки, жиры, клетчатка [10].

Для извлечения белка жмых измельчают и обезжиривают. Затем обезжиренный жмых обрабатывают щелочным раствором для извлечения белка. Полученную суспензию подкисляют, чтобы отделить белок от других компонентов, таких как углеводы, целевой продукт высушивают и измельчают [11]. Белки извлекаются из обезжиренного сырья водными растворами хлорида натрия в щелочной среде, что позволяет повысить выход белковых веществ из сырья [12, 13]. Коэффициент экстракции обычно варьируется от 40% до 70%, где более высокое значение *pH* экстракции связано с более высоким коэффициентом экстракции [5]. По сравнению с другими методами, разработанными для экстракции белков, водная экстракция или прямая щелочная экстракция остается наиболее эффективным и используемым методом [14]. После экстракции суспензия разделяется на отработанную твердую фракцию, содержащую осадок, нерастворенный белок и жидкую фазу. Затем *pH* доводят до изоэлектрической точки для выпадения белков в осадок [15]. Белок, полученный из жмыха рапса, может быть использован в пищевой промышленности за счет хороших функционально-технологических свойств [16, 17].

К недостаткам щелочной экстракции относят образование *D*-форм аминокислот, а также окрашенных соединений в ходе реакции Майяра. При кислотной экстракции происходит значительно меньшая деструкция аминокислот и образование более светлых продуктов [18]. Белковый профиль рапса является уникальным ввиду высокой доли белка, растворимого в кислой среде [19]. Рапс содержит два основных белка – круциферин и напин, которые составляют 66 и 25% от его общего количества. Молекулярная масса круциферина находится в диа-

пазоне 230-300 кДа, а напина – 12-14,5 кДа. Значение изоэлектрических точек (ИЭТ) белков рапса находится в пределах *pH* 4,0-11,0 [20]. Большинство исследований описывает процесс получения изолята белка рапса с помощью щелочной экстракции при *pH* 9,0-12,0 с последующим изоэлектрическим осаждением из экстракта с помощью минеральных кислот в кислой среде [21]. При этом такой подход имеет недостаток в виде необратимой денатурации круциферина и значительной потери растворимого при *pH* 4,0 напина в ходе осаждения в ИЭТ. Белки рапса, нерастворимые при *pH* 3,0-4,0, представлены преимущественно круциферином, при этом напин при данных значениях *pH* растворим. Круциферин имеет растворимость при уровнях *pH* выше 5,5, в то время как напин имеет растворимость в более широком диапазоне *pH* – от 2 до 10. За счет присутствия белков с широким диапазоном молекулярных масс и наличия нескольких изоэлектрических точек рапс является уникальной культурой, высокая доля белков которой имеет растворимость в кислой среде [22]. В литературе содержится недостаточно сведений о кислотной экстракции белка рапса, в связи с чем главными задачами работы являются изучение влияния выбранных условий кислотной экстракции и параметров осаждения экстрагированного белка на функционально-технологические свойства полученного белкового концентрата (БК).

Целью данной работы является разработка технологии получения белкового концентрата рапса путем последовательного обезжиривания, кислотной экстракции и осаждения белков при щелочном значении *pH*, что может способствовать получению продукта высокого качества с точки зрения функционально-технологических свойств и пищевой ценности.

**Методология.** В работе использовали рапсовый жмых, полученный на предприятии ООО «Лебяжский ЗРМ» (Киров, Россия). Количество «сырого» протеина в образцах определяли в соответствии с ГОСТ 13496.4-2019, «сырую» клетчатку по ГОСТ 31675-2012, «сырой» жир по ГОСТ 53153-2008, «сырую» золу по ГОСТ 32933-2014. Сухие вещества определяли путем высушивания до постоянной массы по ГОСТ 31640-2012.

Измельчение рапсового жмыха осуществляли на роторной ударной мельнице «SR 200» («RETSCH», Германия) до размера частиц менее 100 мкм.

Обезжиривание осуществляли с использованием н-гексана в соотношении сырье-экстрагент 1:2-1:6, температуре 20-40°С в течение 20-80 мин.

Кислотную экстракцию белка проводили в течение 15-90 мин, гидромодуле 1:5-1:20, температуре 20-60±1°С и уровне *pH* 2,0-6,0. Осаждение белка осуществляли в изоэлектрической точке напина (белка рапса) при значении *pH* 7,0-10,0 с помощью 20% раствора *NaOH*. Расчет теоретической изоэлектрической точки проводили путем определения суммарного заряда белка в базе данных *PepDraw* [23].

*Определение функционально-технологических свойств.* Определение показателя водосвязывающей способности (ВСС) осуществляли путем смешивания 0,5 г сухого белкового концентрата и 5 см³ дистиллированной воды. Далее проводили перемешивание на вортексе по 10 с каждые 5 мин в течение 30 мин, затем центрифугировали при 8000 мин⁻¹ в течение 20 мин. Надосадочную жидкость сливали, осадок взвешивали. Далее определяли количество воды, удерживаемое 1 г концентрата белка. Определение жиросвязывающей способности (ЖСС) осуществлялось аналогичным способом, но вместо дистиллированноой воды использовали 5 см³ подсолнечного масла [24].

Для определения эмульгирующих свойств проводили гомогенизацию концентрата белка рапса в количестве 3,5 г в 50 см³ дистиллированной воды при 10000 мин⁻¹ в течение 30 с, далее добавляли 50 см³ подсолнечного масла и повторно гомогенизировали при 10000 мин⁻¹ в течение 120 с. Эмульсию разливали по центрифужным пробиркам и центрифугировали при 1100 g в течение 5 мин. Далее определяли отношение объема эмульгированного слоя к общему объему эмульсии. Стойкость эмульсии определяли аналогичным способом, но после гомогенизации образца с подсолнечным маслом проводили выдерживание при 85°С в течение 15 мин, затем пробу охлаждали, центрифугировали и рассчитывали отношение объема эмульгированного слоя к общему объему эмульсии [25].

Для определения пенообразующей способности осуществляли гомогенизацию 3% водного раствора концентрата белка объемом 50 см³ с использованием гомогенизатора при 10000 мин⁻¹ в течение 60 с, затем суспензию переносили в мерный цилиндр объемом 250 см³ и определяли отношение объема пены к общему объему суспензии [25]. Для определения стабильности пены определяли объем пены, оставшийся спустя 20 мин после гомогенизации.

Определение индекса растворимости азота (*NSI*) проводили путем гомогенизации 250 мг концентрата белка в 20 см³ 0,1 М *NaCl* в течение 1 ч при уровне *pH* 7,0 [25]. Затем осуществляли центрифугирование при 20000 g в течение 30 мин. В супернатанте определяли содержание азота и выражали растворимость в процентах от общего количества азота в анализируемом образце.

Электрофорез белков в ПААГ (полиакриламидном геле) проводили по методике Лэммли [26]. Для проведения одномерного электрофореза использовали 10% разделяющий гель и 4% концентрирующий. Электрофоретическое разделение проводили при величине постоянного тока 80 В в концентрирующем геле и 150 В в разделяющем в течение 4 ч. Окрашивание белков проводили с использованием Кумасси бриллиантового синего R-250 (PanReac, Испания).

Белковый концентрат высушивали с использованием лиофильной сушильной установки Pro-

fLyo T50.6 (ООО "Профлаб", Россия) при давлении в камере 0,5 мбар.

**Результаты.** Для снижения сопутствующих при изоляции белка примесей было проведено исследование по определению параметров предварительного обезжиривания рапсового жмыха. На рисунке 1 представлена зависимость количества остаточного жира в жмыхе от соотношения сырья к н-гексану при температуре 40°С, длительности экстракции 60 мин и температуре 40°С. По данным гистограммы видно, что наименьшее количество липидов остается в сырье при соотношении жмых-экстрагент 1:6, однако почти то же остаточное количество жира в сырье можно получить при соотношении 1:5, разница составляет 0,32%.

Были определены параметры температуры и длительности экстракции липидов (рис. 2). С повышением температуры происходит интенсификация процесса экстракции жира. Температура выше 50°С приводит к денатурации белка и уменьшению выхода в процессе экстракции. 1При длительности экстракции 80 мин разница в количестве экстрагированного жира незначительно отличается в сравнении с процессом при выбранных параметрах – 60 мин, 40°С. Остаточное количество жира при выбранных параметрах составит менее 2,5%.

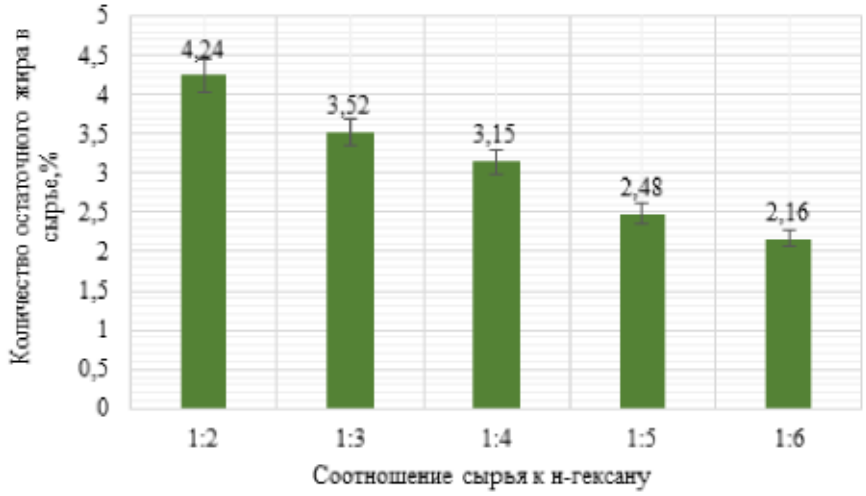



*Рисунок 1 – Зависимость количества остаточного жира от соотношения сырья к н-гексану в процессе обезжиривания*

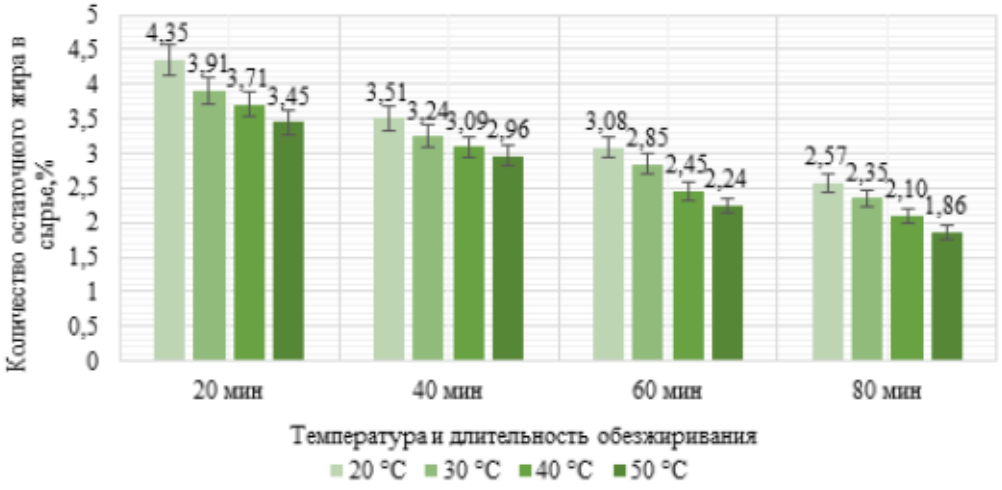



*Рисунок 2 – Зависимость количества остаточного жира от температуры и длительности экстракции*

После предварительного обезжиривания жмыха рапса была проведена кислотная экстракция белков при значении *pH* 2,0-6,0 (рис. 3А), гидромодуле 1:10, температуре экстракции 40°С и длительности процесса 60 мин. Максимальный выход белка был получен при значении *pH* 2,0 – 24,2% от общего содержания в сырье. Экстракция при *pH* 6,0 позволяет получить наименьшей выход – 13,5%. Для дальнейших исследований был выбран *pH* экстракции 4,0. Количество экстрагированного белка при выбранном значении *pH* отличается на 2,6% от процесса при *pH* 2,0.

Далее определяли влияние значения гидромодуля от 1:5 до 1:25 на выход белка в процессе экстракции, остальные параметры экстракции были постоянны – *pH* 4,0, температура 40°С и длительность

процесса 60 мин (рис. 3Б). Максимальные выходы 21,9 и 22,3% были получены при гидромодуле 1:10 и 1:15. Значительной разницы между полученными значениями не установлено, при этом процесс при гидромодуле 1:15 сопровождается большим расходом воды в сравнении с гидромодулем 1:10.

Также варьировали длительность экстракции и значения температуры (рис. 3В и 3Г). Существенное влияние длительности экстракции на выход белка было определено в диапазоне от 30 до 60 мин. С 60 по 90 мин выход белка почти не изменялся. Для экстракции белка была определена длительность процесса 60 мин, позволяющая получить выход 21,8%. Максимальный выход белка получен при температуре 40°С. Дальнейшее увеличение температуры приводило к уменьшению количества получаемого продукта, что объясняется денатурацией белка.

Таким образом, для экстракции белка были выбраны следующие параметры: гидромодуль 1:10, значение *pH* 4,0, длительность 60 мин и температура экстракции 40°С. При выбранных условиях выход белка составляет 21,9% от общего содержания в сырье.

На следующем этапе определяли значение изоэлектрической точки экстрагированного белка рапса. Расчет теоретической изоэлектрической точки путем определения суммарного заряда белка получен с использованием инструментов базы данных *PepDraw*. Белки рапса представлены напином и круциферином. Для расчета теоретической изоэлектрической точки осуществляли поиск аминокислотных последовательностей белков рапса в базе данных *UniProt*. Было определено, что напин имеет 7 изоформ, а круциферин – 5. Результат расчета изоэлектрических точек представлен в таблице 1.

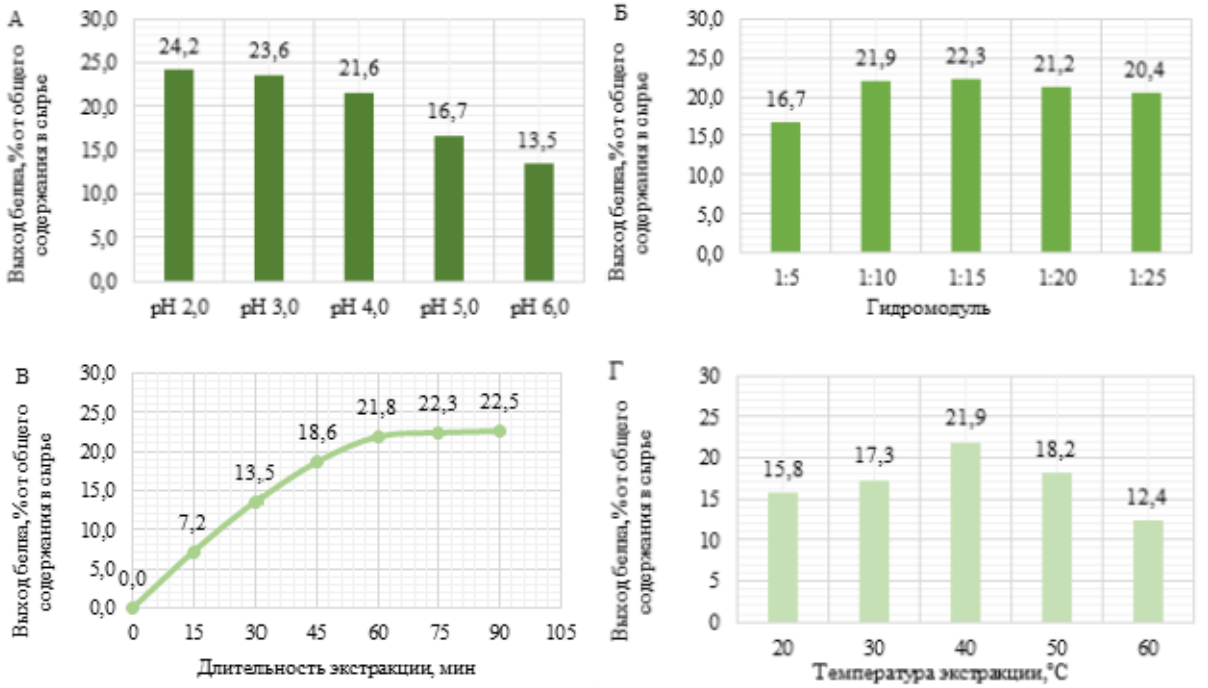



*Рисунок 3 – Влияние уровня pH (А), гидромодуля (Б), температуры (В) и длительности экстракции (Г) на выход белка*

*Таблица 1 – Значение изоэлектрических точек белков рапса*

| Напин | | | Круциферин | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Наименование белка | № в БД UniProt | Значение ИЭТ | Наименование белка | № в БД UniProt | Значение ИЭТ |
| Napin | P17333 | 8,21 | Cruciferin | P11090 | 5,64 |
| Napin-1 | P01091 | 6,35 | Cruciferin CRU1 | P33525 | 5,41 |
| Napin-1A | P24565 | 4,80 | Cruciferin CRU4 | P33522 | 4,66 |
| Napin-2 | P01090 | 7,01 | Cruciferin BnC1 | P33523 | 5,64 |
| Napin-3 | P80208 | 8,65 | | | |
| Napin-B | P27740 | 8,21 | Cruciferin BnC2 | P33524 | 5,64 |
| Napin embryo-specific | P09893 | 8,22 | | | |
| Среднеарифметическое значение ИЭТ для напина | | 7,35 | Среднеарифметическое значение ИЭТ для круциферина | | 5,39 |
| Среднеарифметическое значение ИЭТ для белков рапса | | 6,54 | | | |

По данным таблицы 1 видно, что изоформы белка напина имеют изоэлектрические точки в широком диапазоне значений *pH* 4,80-8,65. Все белки круциферина характеризуются минимальной растворимостью при *pH* 4,66-5,64. Далее экспериментальным путем было проведено определение значения изоэлектрической точки белков из кислотного экстракта (табл. 2). Для каждого варианта *pH* использовали экстракт, полученный путем приготовления 200 г суспензии обезжиренного жмыха рапса с гидромодулем 1:10 и экстракции белка при значении *pH* 4,0, температуре 40°С и длительности 60 мин.

Наибольший выход белков получен в ходе осаждения при значении *pH* 10,0 – 26,21% от общего содержания в сырье.

Минимальный выход белков получен при значении *pH* 7,0 – 20,68% от общего содержания в сырье. Несмотря на то, что выход белков при *pH* 7,0 отличается на 5,5% от изоляции при *pH* 10,0, белковый концентрат имеет значительно более светлый цвет. Цвет имеет важное значение для использования белка в пищевой промышленности. Увеличение значения *pH* приводит к образованию белковых концентратов темно-зеленого цвета (рис. 4). При ИЭТ 8,0 белковый концентрат представлен порошком кремового цвета.

В белковых концентрах, полученных при значении *pH* 7,0-10,0, была обнаружена высокая доля напина с молекулярной массой менее 20 кДа, представленная двумя крупными полосами на электрофореграмме (рис. 5).

Во всех образцах присутствует небольшое количество остатка напина, менее 15 кДа, который не до конца диссоциирует в присутствии *β*-меркаптоэтанола. Также были обнаружены полосы, имеющие молекулярную массу около 27-30 кДа и 40-45 кДа, характерные для круциферина.

Далее осуществляли высушивание белкового концентрата в лиофильной сушильной установке «ProfLyo T50.6» (ООО "Профлаб", Россия) при давлении в камере 0,5 мбар. Полученный белковый концентрат обладает высокой водосвязывающей способностью (табл. 3).

*Таблица 2 – Выход белков в процессе осаждения при значениях pH 7,0-10,0*

| Наименование показателя | Значение pH при осаждении белка | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 7,0 | 8,0 | 9,0 | 10,0 |
| Содержание СВ образца, % | 13,80 | 13,92 | 13,79 | 13,82 |
| Выход белка, % от общего содержания в сырье | 20,68 | 22,98 | 24,51 | 26,21 |
| Выход белка, % от массы сырья | 7,46 | 8,29 | 8,85 | 9,46 |

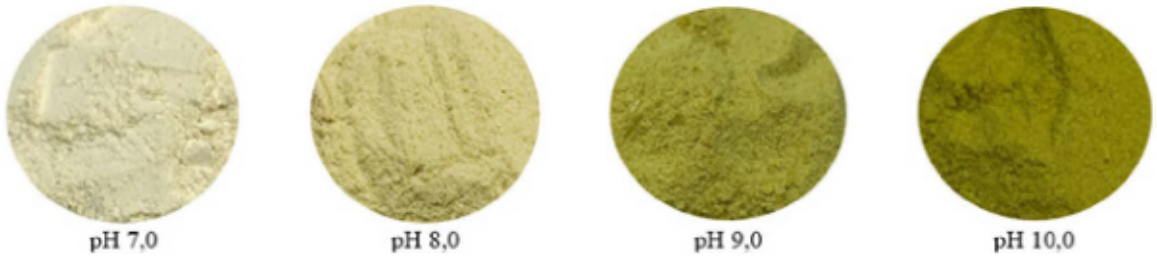



*Рисунок 4 – Внешний вид лиофильно высушенного белкового концентрата рапса, полученного в ходе осаждения при значениях pH 7,0-10,0*

*Таблица 3 – Функционально-технологические свойства белкового концентрата рапса*

| Наименование показателя | Значение |
|---|---|
| Водосвязывающая способность, г воды /г БК | 4,85±0,7 |
| Жиросвязывающая способность, г масла/г БК | 2,30±0,4 |
| Эмульгирующая способность, % | 79±1,1 |
| Стойкость эмульсии, % | 59±0,8 |
| Пенообразующая способность, % | 67±1,0 |
| Стойкость пены, % | 38±0,5 |
| pH (1:10 дистиллированной воды) | 6,8±0,2 |
| Индекс растворимости азота (NSI), % | 29,2±1,33 |

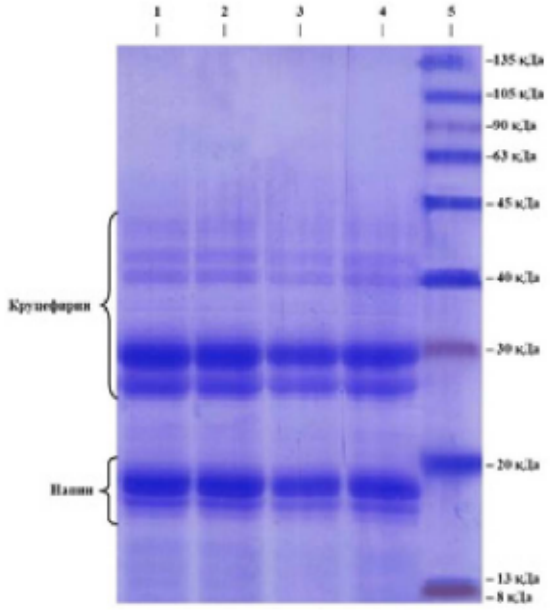



*Рисунок 5 – Электрофореграмма белкового концентрата рапса*
*Линия 1 – БК, осажденный в ИЭТ при pH 10,0; линия 2 – БК, осажденный в ИЭТ при pH 9,0; линия 3 – БК, осажденный в ИЭТ при pH 8,0; линия 4 – БК, осажденный в ИЭТ при pH 7,0 – стандарт молекулярных масс)*

Значение ВСС составило 4,85 г воды, а ЖСС – 2,30 г масла/г белкового концентрата. Индекс растворимости азота – 29,2%. Из исходного жмыха рапса получен белковый концентрат с содержанием целевого продукта 78,63±1,96%, СВ 92,50±1,38% и с выходом 20,68% от общего содержания в сырье.

**Обсуждение.** На выход белка из масличного сырья значительное влияние оказывает высокое содержание жира. Для извлечения остаточного в жмыхе масла используют растворитель, что обусловлено эффективным и экономичным методом экстракции, а также незначительным количеством остаточного масла – в среднем около 1% [27]. На процесс обезжиривания оказывает влияние природа экстрагента, его соотношение к сырью, температура и длительность экстракции. Наиболее эффективно процесс обезжиривания проходит с использованием н-гексана [28]. Большой расход гексана для экстракции липидов компенсируется относительно небольшой длительностью экстракции, а также возможностью ректификации смеси экстрагент-масло с целью повторного применения н-гексана. При выбранных в исследовании условиях обезжиривания остаточное содержание жира составит менее 2,5%.

В ходе определения параметров экстракции белков рапса было установлено, что температура экстракции более 40°С снижает выход целевого продукта, а при использовании гидромодуля 1:5 наблюдается повышение вязкости суспензии, ввиду чего снижается уровень перемешивания и эффективность экстракции белков.

Осаждение белков из экстракта в ИЭТ при pH 9,0 и 10,0 приводит к значительному потемнению белков с характерным зеленым оттенком. Цветность белковых препаратов объясняется образованием окрашенных комплексов фенольных соединений с белками, даже при очень низких концентрациях [21]. Таким образом, изоляцию белков рапса из кислого экстракта рационально осуществлять при значении pH 7,0. Выход белка составляет 20,68% от общего содержания в сырье. Полученный белковый концентрат имеет светлый цвет. В случае традиционной водной экстракции в щелочной среде и кислотного осаждения будет потеряна примерно четверть белка, имеющего высокую растворимость в кислой среде.

В целом, полученный электрофоретический белковый профиль аналогичен электрофореграммам, представленным в работах Akbari и Wu (2015) и Perera и др. (2016) [20, 29].

Дальнейшие исследования свойств рапса позволят разработать инновационные продукты, которые найдут применение в различных отраслях промышленности [30]. Концентраты и изоляты белка рапса являются новым продуктом на рынке растительных белков. Они обладают желаемыми для потребителя питательными и функциональными свойствами, которые в значительной степени зависят от характеристик сырья и способа получения [31, 32].

**Выводы.** Экспериментально определены параметры обезжиривания рапсового жмыха и получения белкового концентрата рапса путем водной экстракции в кислой среде, позволяющие получить белковый препарат с высокими функционально-технологическими свойствами. Описанная технология экстракции позволяет извлечь около четверти белка, находящегося в растворимом состоянии при традиционной технологии – водной экстракции в щелочной среде и осаждения в кислой среде. Для обезжиривания жмыха рапса проводят экстракцию н-гексаном в соотношении сырье-растворитель 1:5, температуре 40°С в течение 60 мин. Остаточное содержание жира в сырье составляет менее 2,5%. Кислотную экстракцию целесообразно осуществлять при гидромодуле 1:10, значении *pH* 4,0, длительности 60 мин и температуре экстракции 40°С. Изоляцию белка проводят при значении *pH* 7,0. При выбранных условиях выход белка составляет 20,68% от общего содержания в сырье с содержанием целевого продукта 78,63±1,96%. Белковый концентрат имеет значение ВСС 4,85±0,7 и ЖСС 2,30±0,4.

Дальнейшие исследования будут направлены на определение условий проведения щелочной экстракции белка рапса из жмыха после кислотной экстракции и предварительной ферментативной предобработки с использованием целлюлолитических ферментных препаратов. Комплексный подход к переработке жмыха рапса в белковые препараты позволит повысить выход целевого продукта, а также получать различные по функционально-технологическим свойствам белковые препараты.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Обзор мирового рынка рапса: тенденции и прогнозы // Масложировой Союз России: [сайт]. - URL: https://mzhsr.ru/analitika/otrasl-sostoyanie-i-prognoz/obzor-mirovogo-ryinka-rapsa (дата обращения: 25.09.2024).

2. Зубкова Т.В., Виноградов Д.В., Гогмачадзе Г.Д. Эффективность некорневой обработки микроудобрениями при выращивании ярового рапса // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2021. – №. 1. – С. 43.

3. Tileuberdi N., Turgumbayeva A., Yeskaliyeva B., Sarsenova L., Issayeva R. Extraction, isolation of bioactive compounds and therapeutic potential of rapeseed (Brassica napus L.) // Molecules. – 2022. – Vol. 27. – №. 24. – P. 8824. https://doi.org/10.3390/molecules27248824.

4. Смольникова Я.В., Коломейцев А.В., Стутко О.В., Брошко Д.В. Оценка функционально-технологических свойств белкового изолята рапса сорта сибирский // Вестник Университета Шакарима. Серия технические науки. – 2023. – №. 4 (8). – С. 36-42. https://doi.org/10.53360/2788-7995-2022-4(8)-5.

5. Fetzer A., Herfellner T., Stäbler A., Menner M., Eisner P. Influence of process conditions during aqueous protein extraction upon yield from pre-pressed and cold-pressed rapeseed press cake // Industrial Crops and Products. – 2018. – Vol. 112. – P. 236-246. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.12.011.

6. Zhang K.X. et al. Evaluation of the standardized ileal digestibility of amino acids of rapeseed meals varying in protein solubility for Pekin ducks // Poultry science. – 2020. – Vol. 99. – №. 2. – P. 1001-1009. https://doi.org/10.1016/j.psj.2019.10.012.

7. Kdidi S. et al. Electrostatic separation for sustainable production of rapeseed oil cake protein concentrate: Effect of mechanical disruption on protein and lignocellulosic fiber separation // Powder Technology. – 2019. – Vol. 344. – P. 10-16. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.11.107.

8. Shen J. et al. A comprehensive review of health-benefiting components in rapeseed oil // Nutrients. – 2023. – Vol. 15. – №. 4. – P. 999. https://doi.org/10.3390/nu15040999.

9. Рензяева Т.В., Рензяев А.О., Кравченко С.Н., Резниченко И.Ю. Потенциал рапсовых жмыхов в качестве сырья пищевого назначения // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2020. – №. 2. – С. 143-160. https://doi.org/10.36107/spfp.2020.213.

10. Кузнецова Г.Н., Полякова Р.С. Высокопродуктивный сорт сурепицы яровой тип «000» Грация // Масличные культуры. – 2021. – №. 3 (187). – С. 96-99. DOI: 10.25230/2412-608X-2021-3-187-96-99.

11. Teh S.S., Bekhit A.E.D., Carne A., Birch, J. Effect of the defatting process, acid and alkali extraction on the physicochemical and functional properties of hemp, flax and canola seed cake protein isolates // Journal of Food Measurement and Characterization. – 2014. – Vol. 8. – P. 92-104. https://doi.org/10.1007/s11694-013-9168-x.

12. Брошко Д.В., Лушников М.С. Влияние обезжиривания на выход белка из рапсового и рыжикового жмыхов // Инновационные тенденции развития российской науки. – 2020. – С. 310-314.

13. Зинченко Д.В., Муранова Т.А., Меланьина Л.А., Мирошников, А.И. Гидролиз белков сои и рапса экстрактом из пилорических придатков трески // Прикладная биохимия и микробиология. – 2019. – Т. 55. – №. 2. – С. 172-180. DOI: 10.1134/S0555109919020181.

14. Arrutia F., Binner E., Williams P., Waldron K. W. Oilseeds beyond oil: Press cakes and meals supplying global protein requirements // Trends in Food Science & Technology. - 2020. - Vol. 100. - P. 88-102. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.03.044.

15. Ahlström C. et al. The effect of precipitation pH on protein recovery yield and emulsifying properties in the extraction of protein from cold-pressed rapeseed press cake // Molecules. – 2022. – Vol. 27. – №. 9. – P. 2957. https://doi.org/10.3390/molecules27092957.

16. Mupondwa E., Li X., Wanasundara J.P.D. Technoeconomic prospects for commercialization of Brassica (cruciferous) plant proteins // Journal of the American Oil Chemists' Society. – 2018. – Vol. 95. – №. 8. – P. 903-922. http://dx.doi.org/10.1002/aocs.12057.

17. Baker P.W. et al. Pilot scale extraction of protein from cold and hot-pressed rapeseed cake: Preliminary studies on the effect of upstream mechanical processing // Food and Bioproducts Processing. – 2022. – Vol. 133. – P. 132-139. https://doi.org/10.1016/j.fbp.2022.03.007.

18. Нгует Х.Т.М. Исследование процесса экстракции белковых веществ из белого лепестка сои водными растворами минеральных кислот и щелочей // Успехи в химии и химической технологии. – 2007. – Т. 21. – №. 12 (80). – С. 33-35.

19. Quinn J.R., Jones J.D. Rapeseed protein. pH solubility and electrophoretic characteristics // Canadian Institute of Food Science and Technology Journal. – 1976. – Vol. 9. – №. 1. – P. 47-51. https://doi.org/10.1016/S0315-5463(76)73593-4.

20. Akbari A., Wu J. An integrated method of isolating napin and cruciferin from defatted canola meal // LWT-Food Science and Technology. – 2015. – Vol. 64. – №. 1. – P. 308-315. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.05.046.

21. Albe-Slabi S., Defaix C., Beaubier S., Galet O., Kapel R. Selective extraction of napins: Process optimization and impact on structural and functional properties // Food Hydrocolloids. – 2022. – Vol. 122. – P. 107105. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107105.

22. Wanasundara J.P.D., McIntosh T.C., Perera S.P., Withana-Gamage T.S., Mitra, P. Canola/rapeseed protein-functionality and nutrition // OCl. – 2016. – Vol. 23. – №. 4. – P. D407. https://doi.org/10.1051/ocl/2016028.

23. PepDraw: [сайт] – URL: https://pepdraw.com/ (дата обращения: 25.09.2024).

24. Keivaninahr F., Gadkari P., Benis K.Z., Tulbek M., Ghosh, S. Prediction of emulsification behaviour of pea and faba bean protein concentrates and isolates from structure-functionality analysis // RSC advances. – 2021. – Vol. 11. – №. 20. – P. 12117-12135. https://doi.org/10.1039/D0RA09302E.

25. Lqari H., Vioque J., Pedroche J., Millán F. Lupinus angustifolius protein isolates: chemical composition, functional properties and protein characterization // Food chemistry. – 2002. – Vol. 76. – №. 3. – P. 349-356. https://doi.org/10.1016/S0308-8146(01)00285-0.

26. Fetzer A., Herfellner T., Eisner P. Rapeseed protein concentrates for non-food applications prepared from pre-pressed and cold-pressed press cake via acidic precipitation and ultrafiltration // Industrial Crops and Products. – 2019. – Vol. 132. – P. 396-406. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.02.039.

27. Gaber M.A.F.M., Tujillo F.J., Mansour M.P., Juliano, P. Improving oil extraction from canola seeds by conventional and advanced methods // Food engineering reviews. – 2018. – Vol. 10. – P. 198-210. https://doi.org/10.1007/s12393-018-9182-1.

28. Citeau M., Regis J., Carré P., Fine, F. Value of hydroalcoholic treatment of rapeseed for oil extraction and protein enrichment // Ocl. – 2019. – Vol. 26. – P. 1. https://doi.org/10.1051/ocl/2018035.

29. Perera S.P., McIntosh T.C., Wanasundara J.P.D. Structural properties of cruciferin and napin of Brassica napus (canola) show distinct responses to changes in pH and temperature // Plants. – 2016. – Vol. 5. – №. 3. – P. 36. https://doi.org/10.3390/plants5030036.

30. Jia W., Rodriguez-Alonso E., Bianeis M., Keppler J.K., van der Goot A.J. Assessing functional properties of rapeseed protein concentrate versus isolate for food applications // Innovative Food Science & Emerging Technologies. – 2021. – Vol. 68. – P. 102636. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102636.

31. Зинченко Д.В., Муранова Т.А., Меланьина Л.А., Белова Н.А., Мирошников, А.И. Гидролиз белков сои и рапса ферментным препаратом протосубтилин // Прикладная биохимия и микробиология. – 2018. – Т. 54. – №. 3. – С. 277-285. DOI: 10.7868/S0555109918030066.

32. Georgiev R., Kalaydzhiev H., Ivanova P., Silva C.L., Chalova, V.I. Multifunctionality of rapeseed meal protein isolates prepared by sequential isoelectric precipitation // Foods. – 2022. – Vol. 11. – №. 4. – P. 541. https://doi.org/10.3390/foods11040541.

*Статья поступила в редакцию 29.10.2024*
*Статья принята к публикации 13.12.2024*

УДК 004.5(523.4-36:641.1)
EDN: BCCSNJ

# ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

© Автор(ы) 2024

SPIN: 7513-1585
AuthorID: 307536
ORCID: 0000-0003-2479-8750
ResearcherID: E-9331-2014
ScopusID: 57190976010

**ДАВЫДЕНКО Наталия Ивановна,** доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой технологии и организации общественного питания
*Кемеровский государственный университет*
*(650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, д. 6, e-mail: nat1861@yandex.ru)*

SPIN: 2081-7995
AuthorID: 1102029
ORCID: 0000-0003-3441-4351
ResearcherID: AAZ-8013-2021
ScopusID: 57221330376

**ЗИРКА Анна Юрьевна,** старший преподаватель
кафедры технологии и организации общественного питания
*Кемеровский государственный университет*
*(650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, д. 6, e-mail: zirka.anna05@gmail.com)*

SPIN: 7743-5130
AuthorID: 361443
ORCID: 0000-0002-2170-1821
ResearcherID: G-6229-2018
ScopusID: 57214139422

**КУРАКИН Михаил Сергеевич,** доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры технологии и организации общественного питания
*Кемеровский государственный университет*
*(650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, д. 6, e-mail: kurakin1979@mail.ru)*

SPIN: 1741-9576
AuthorID: 353426
ORCID: 0000-0001-8917-7299
ResearcherID: AAZ-3976-2021
ScopusID: 57216442162

**КОСТИНА Наталья Геннадьевна,** кандидат технических наук,
доцент кафедры технологии и организации общественного питания
*Кемеровский государственный университет*
*(650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, д. 6, e-mail: oliegh.kostin@inbox.ru)*

**Аннотация**. Применение систем на базе искусственного интеллекта позволяет расширять возможности и ускорять процессы обработки информации во всех сферах человеческой деятельности. Алгоритмы искусственного интеллекта позволяют находить новый подход к решению многоаспектных проблем. Среди причин формирования алиментарно-зависимых заболеваний одной из наиболее распространенных является недостаточное потребление йода. В рамках данной работы применили алгоритмы машинного обучения для прогнозирования содержания йода в готовой продукции на базе данных фактического содержания йода в термически обработанных продуктах питания. Для применения машинного обучения были выявлены факторы косвенного влияния на фактическое содержание йода, которые благоприятно сказываются на термической устойчивости йода: справочное содержание йода, белка, витаминов группы А и Е и факторы негативного влияния: время и температура термической обработки, предварительная подготовка сырья (заморозка, пастеризация). В ходе подбора наиболее эффективного алгоритма прогноза были проанализированы следующие модели машинного обучения: дерево решений, случайный лес, линейная регрессия. Качество прогноза оценивали по среднему отклонению и коэффициенту детерминации. Наилучшее качество прогноза показала модель дерево решений, среднее отклонение составило 1,8 мкг йода на 100 г продукта на обучающей выборке. При оценке модели на тестовых данных было выявлено отклонение 1 мкг йода на 100 г продукта.

**Ключевые слова:** йод, пищевые продукты, продукты питания, машинное обучение, прогнозирование химического состава, химический состав пищевых продуктов, искусственный интеллект, дефицит йода, база данных.

# APPLICATION OF MACHINE LEARNING ALGORITHMS FOR PREDICTING THE CHEMICAL COMPOSITION OF FOOD PRODUCTS

© Author(s) 2024

**DAVYDENKO Nataliia Ivanovna**, doctor of technical sciences, associate professor,
head of Technology and organization of public catering Department
*Kemerovo State University*
*(650000, Russia, Kemerovo, Krasnaya St., 6, e-mail: nat1861@yandex.ru)*
**ZIRKA Anna Yuryevna,** senior lecturer
of Technology and organization of public catering Department
*Kemerovo State University*
*(650000, Russia, Kemerovo, st. Krasnaya St., 6, e-mail: zirka.anna05@gmail.com)*
**KURAKIN Mikhail Sergeevich**, doctor of technical sciences, associate professor,
professor of Technology and organization of public catering Department
*Kemerovo State University*
*(650000, Russia, Kemerovo o, Krasnaya st., 6, e-mail: kurakin1979@mail.ru)*
**KOSTINA Natalia Gennadievna**, candidate of technical sciences,
associate professor of Technology and organization of public catering Department
*Kemerovo State University*
*(650000, Russia, Kemerovo, Krasnaya St., 6, e-mail: oliegh.kostin@inbox.ru)*

**Abstract**. The use of artificial intelligence-based systems allows us to expand capabilities and speed up information processing in all areas of human activity. Artificial intelligence algorithms allow us to find a new approach to solving multifaceted problems. Among the causes of alimentary-dependent diseases, one of the most common is insufficient iodine intake. In this work, machine learning algorithms were used to predict the iodine content in finished products based on the actual iodine content in thermally processed food products. To apply machine learning, factors indirectly influencing the actual iodine content were identified, which have a beneficial effect on the thermal stability of iodine: reference content of iodine, protein, vitamins A and E, and factors of negative influence: time and temperature of heat treatment, preliminary preparation of raw materials (freezing, pasteurization). During the selection of the most effective forecast algorithm, the following machine learning models were analyzed: decision tree, random forest, linear regression. The forecast quality was assessed by the mean deviation and the determination coefficient. The decision tree model showed the best forecast quality, the average deviation was 1.8 mcg of iodine per 100 g of product in the training sample. When evaluating the model on test data, a deviation of 1 mcg of iodine per 100 g of product was found.

**Keywords**: iodine, food products, food products, machine learning, chemical composition prediction, chemical composition of food products, artificial intelligence, iodine deficiency, database.

*Для цитирования: Давыденко Н.И. Применение алгоритмов машинного обучения для прогнозирования химического состава пищевых продуктов / Н.И. Давыденко, А.Ю. Зирка, М.С. Куракин, Н.Г. Костина // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 4(68). – С. 182-190. – EDN: BCCSNJ.*

**Введение.** Сфера применения информационных технологий (ИТ) на базе искусственного интеллекта (ИИ) ежедневно расширяется. Использование технологий на базе ИИ позволяет обрабатывать большие объемы данных с меньшими временными затратами в сравнении с трудовой (умственной) деятельностью человека, выявлять неочевидные закономерности, оценивать и контролировать все этапы производства продукции в режиме реального времени, принимать более обоснованные и эффективные решения в производственных условиях. К основным методам ИИ относят [1, 2]:

– машинное обучение – метод, который основан на обучении алгоритма решать задачи на основе сходного множества решений;

– нейронные сети – математический алгоритм, запрограммированный по образу человеческого мозга, который способен решать задачи за счет обучения на неидеальных данных;

– машинное зрение – использование ИИ для идентификации объекта на видео или изображении;

– роботизация – применение роботизированных машин, которые способны выполнять ряд функций, полностью или частично заменяя человеческий;

– др.

Применение методов обработки информации с использованием ИИ возможно в любой сфере жизни человека. Наиболее обширное применение они получили в машиностроении, банковском деле, медицине и др. Области применения ИТ на базе ИИ согласно литературным источникам [3, 4] представлено на рисунке 1.

Рассмотрим подробней особенности использования ИИ в питании [11-14]:

a. Сбор и анализ рационов различных групп населения – методы обработки информации с использованием ИИ позволяют выявить неявные закономерности, проводить обработку большего количества данных, чем могут системы без ИИ.

b. Разработка рекомендаций для формирования

полноценного рациона – ИИ может выявить на основе рациона дефициты нутриентов, которые могут возникнуть, давать рекомендации, плавно изменяя нерациональные пищевые привычки.

с. Прогнозирование химического состава продуктов питания – используя научные наработки в области химического состава пищевых продуктов машинное обучение делает возможным более точно определять нутриентный состав готовой к употреблению пищевой продукции, что позволит составлять более полноценные рационы.

Использование систем на базе ИИ помимо явных преимуществ, имеет и ряд недостатков. Наиболее существенный из них – это стоимость готовых систем и сложность их разработки. Для разработки таких систем необходимо обладать определенными навыками, иметь достаточные вычислительные мощности и собрать огромную базу размеченных данных для корректного обучения, без которой система будет нежизнеспособна.

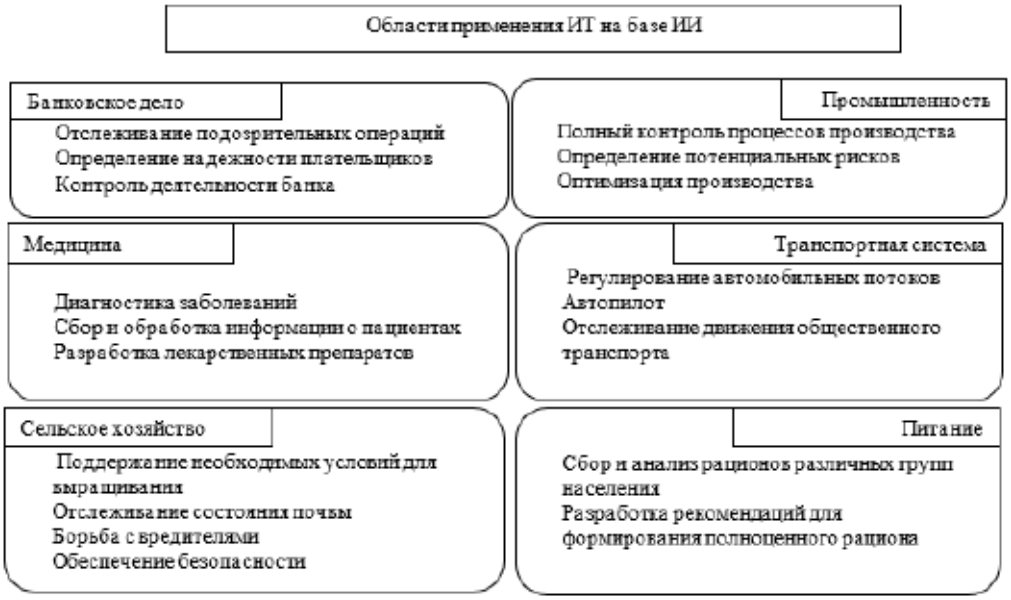



*Рисунок 1 – Применение ИИ в разных сферах деятельности человека [3-10]*

В последние годы применение ИИ в сфере питания представляет особый интерес. Данная сфера характеризуется комплексностью: состоит из разработчиков и производителей пищевой продукции, а также продукции общественного питания, потребителей данной продукции, контролирующих организаций, ученых профильных образовательных и научно-исследовательских учреждений. Согласно ФЗ "О качестве и безопасности пищевых продуктов" одним из главных приоритетов в рассматриваемой сфере является обеспечение населения здоровым, в т. ч. сбалансированным, питанием.

В настоящее время проблема несбалансированного питания усиленно изучается. Согласно данным Росстата, число заболеваний, вероятно обусловленных нерациональным потреблением пищевых продуктов, составило в 2021 году 2362,5 случаев на 100 тыс. всего населения (или 2,8 % от общей первичной заболеваемости) [15]. Причиной высокого уровня заболеваемости, связанной с нерациональным питанием, являются в первую очередь, сформированные у значительной части населения стереотипы пищевого поведения, способствующие построению рационов без учета принципов здорового питания. Как итог – увеличенное потребление сахара, мучных и кондитерских изделий и сниженное потребление овощей и фруктов, что приводит к дефициту ряда нутриентов, необходимых для жизнедеятельности человека. Наиболее остро сегодня для России стоит проблема дефицита витаминов *A* и *D*, микронутриентов: йода, магния, кальция и др., при этом зачастую проблемы обусловлены и усугубляются природно-климатическими факторами местности проживания [16-18].

Помимо формирования правильных потребительских предпочтений немаловажным фактором в рационализации питания населения является создание сбалансированных рационов как при организованном питании в санаториях, в детских дошкольных учреждениях, школах, больницах и т.д., так и в домашних условиях. Для разработки полноценных рационов необходимо использовать актуальную информацию о химическом составе пищевых продуктов. В данных условиях зачастую используются общепринятые справочники химического состава, некоторые данные в которых не обновлялись более 35 лет. При этом произошло обновление материально-техничекой базы пищеблоков, в организованное, особенно детское питание, активно внедряются новые технологические приемы, способствующие сохранности основных пищевых веществ и микро-, макронутриентов, появляются новые виды пище-

вого сырья, данные охимическом составе которого отсутствуют в официальных источниках [19, 20].

Учитывая современное развитие науки и совершенствование методов анализа пищевых продуктов, считаем, что актуализация данных химического состава пищевых продуктов и использование элементов ИИ для его прогнозирования является актуальным и перспективным направлением исследований.

**Методология.** Целью исследования являлось оценка возможности применения алгоритма машинного обучения для прогнозирования химического состава пищевых продуктов на примере сформированной базы данных содержания йода в продуктах питания.

Для достижения поставленной цели в рамках данной работы поставлены следующие задачи:

1. Исследовательский анализ данных – провести оценку базы данных фактического содержания йода в продуктах питания, оценить распределения и корреляцию влияющих признаков.

2. Подготовка данных к обучению – провести кодирование категориальных данных, выделить целевой признак.

3. Обучение моделей – обучить модели с различной структурой, сравнить результаты их прогнозов содержания йода с фактическими результатами по выбранному показателю.

4. Тестирование выбранной модели – сравнить спрогнозированное содержание йода с реальными данными и оценить жизнеспособность модели.

Объектом исследования являлась база данных фактического содержания йода в продуктах питания – свидетельство о регистрации базы данных № 2023623250 [21].

Методы применяемые в процессе решения поставленных задач:

Подготовку данных, кодирование категориальных признаков, программирование моделей машинного обучения проводили с применением языка программирования Python [22].

Корреляцию числовых признаков (справочное и фактическое содержание йода, содержание витаминов и др.) определяли по критерию Пирсона [23].

Для машинного обучения использовали следующие модели: линейная регрессия, дерево решений, случайный лес [23, 24].

Качество и адекватность полученных результатов прогноза запрограммированных моделей машинного обучения оценивали при помощи среднего абсолютного отклонения между спрогнозированным и фактическим значениями и коэффициенту детерминации [25].

Для точного прогноза были выявлены следующие факторы, которые должны учитываться для снижения отклонения спрогнозированного и фактического значения:

– числовые признаки (справочное содержание йода, белка, витаминов *A* и *E*, время и температура термической обработки);

– категориальные признаки (тип сырья, вид термической обработки, подготовка сырья, тип использованной обогащающей добавки).

Целевым признаком и результатом прогноза является фактическое содержание йода.

Кодирование данных осуществляли унитарным методом.

**Результаты.** *1. Исследовательский анализ данных.* Для машинного обучения представлена следующая база данных, в которой представлено 90 объектов и 12 факторов (столбцов), фрагмент которой представлен на рисунке 2.

| | Наименование продукта | йод | белок | a | e | тип сырья | факт | подготовка сырья | тип термической обработки | время | температура | обогащение |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | Пшеница твердая | 11.0 | 13.0 | 0 | 3.4 | зерновые | 14.2 | нет | нет | 0 | 0 | нет |
| 1 | Рожь | 9.3 | 9.9 | 0 | 2.8 | зерновые | 7.5 | нет | нет | 0 | 0 | нет |
| 2 | Соя | 8.2 | 34.9 | 0 | 1.9 | зерновые | 15.5 | нет | нет | 0 | 0 | нет |
| 3 | Гречиха | 5.1 | 10.8 | 0 | 0.8 | зерновые | 4.6 | нет | нет | 0 | 0 | нет |
| 4 | Кукуруза | 5.2 | 10.3 | 0 | 1.3 | зерновые | 4.2 | нет | нет | 0 | 0 | нет |
| 5 | Фасоль зерно | 12.1 | 21.0 | 0 | 0.6 | зерновые | 16.8 | нет | нет | 0 | 0 | нет |
| 6 | Овсяная | 6.0 | 12.3 | 0 | 1.7 | зерновые | 6.1 | нет | нет | 0 | 0 | нет |
| 7 | Молоко коровье стерилизованное | 9.0 | 2.9 | 10 | 0.0 | молочные | 5.2 | пастеризация | нет | 0 | 0 | нет |
| 8 | Сухое молоко цельное | 50.0 | 24.2 | 130 | 0.4 | молочные | 38.8 | нет | нет | 0 | 0 | нет |
| 9 | Картофель | 5.0 | 2.0 | 0 | 0.1 | овощи | 8.2 | нет | нет | 0 | 0 | нет |

*Рисунок 2 – Фрагмент вывода программного кода. Первые 10 строк базы данных*

В исследуемой базе данных представлены следующие столбцы:

– Наименование продукта – отражает наименование и краткую характеристику продукта.

– Йод – совокупное содержание йода в продукте питания с учетом справочного содержания и дополнительно внесенного йода (мкг на 100 г).

– Белок (г на 100 г), *A* (мкг на 100 г), *E* (мг на 100 г) – справочное содержание белка, витаминов *A* и *E* в продуктах питания.

– Тип сырья – тип основного йодсодержащего сырья (зерновое, фрукты, овощи, грибы, мясо, морепродукты и др.)

– Факт – фактическое содержание йода (мкг на

100 г) в продуктах питания на основе лабораторных исследований.

– Подготовка сырья – замороженное/пастеризованное.

– Тип термической обработки – описание технологии приготовления (варка, жарка, запекание, комбинированный и др.).

– Время (мин.) – продолжительность воздействия температуры в процессе обработки/приготовления продукции.

– Температура (°С) – температура воздействия в процессе обработки/приготовления продукции.

– Обогащение – природа происхождения вносимого препарата с йодом (органический или неорганический).

Для упрощения написания программного кода были использованы сокращенные названия влияющих признаков («*A*» вместо «Содержание витамина *A* (мкг на 100 г) на 100 г продукта»).

С целью определить общее распределение числовых значений, максимальные, средние и минимальные значения проведен корреляционный анализ и анализ распределения (рис. 3).

При анализе числовых факторов и целевого признака (фактическое содержание йода – «факт») и их корреляции было выявлено: среднее справочное содержание йода (82 мкг на 100 г) в 2,3 раза больше фактического (35 мкг на 100 г), это в первую очередь связано с потерями при термической обработке в готовой продукции, однако расхождения сильно превышают стандартное значение. Наибольшее время термической обработки в анализируемой базе данных составляет 150 минут, максимальная температура 200°С. Наибольшее взаимовлияние фактического содержания йода отмечается со справочным содержанием йода и витамина *E*. Практически отсутствует корреляция с содержанием витамина *A*.

Диаграммы распределения основных признаков в базе данных представлены на рисунке 4.

```
Ввод [6]: 1 df.describe()
```

Out[6]:

| | йод | белок | a | e | факт | время | температура |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| count | 90.000000 | 90.00000 | 90.000000 | 90.000000 | 90.000000 | 90.000000 | 90.000000 |
| mean | 82.194444 | 13.19000 | 18.833333 | 0.970000 | 35.440000 | 22.244444 | 68.211111 |
| std | 81.552352 | 6.62464 | 48.005442 | 1.693421 | 43.155965 | 31.021671 | 68.446566 |
| min | 4.000000 | 0.60000 | 0.000000 | 0.000000 | 1.000000 | 0.000000 | 0.000000 |
| 25% | 8.400000 | 10.22500 | 0.000000 | 0.125000 | 6.375000 | 0.000000 | 0.000000 |
| 50% | 64.500000 | 16.00000 | 10.000000 | 0.750000 | 21.850000 | 15.000000 | 70.000000 |
| 75% | 135.000000 | 16.00000 | 10.000000 | 0.900000 | 49.800000 | 30.000000 | 122.500000 |
| max | 400.000000 | 34.90000 | 250.000000 | 16.000000 | 303.100000 | 150.000000 | 200.000000 |

```
Ввод [7]: 1 df.corr()
```

Out[7]:

| | йод | белок | a | e | факт | время | температура |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| йод | 1.000000 | 0.240381 | -0.081028 | 0.487265 | 0.799250 | 0.401067 | 0.146732 |
| белок | 0.240381 | 1.000000 | 0.080853 | 0.029635 | 0.124137 | 0.167069 | -0.054060 |
| a | -0.081028 | 0.080853 | 1.000000 | 0.027980 | -0.014582 | -0.142330 | -0.064519 |
| e | 0.487265 | 0.029635 | 0.027980 | 1.000000 | 0.749084 | -0.143821 | -0.191805 |
| факт | 0.799250 | 0.124137 | -0.014582 | 0.749084 | 1.000000 | 0.076782 | -0.062660 |
| время | 0.401067 | 0.167069 | -0.142330 | -0.143821 | 0.076782 | 1.000000 | 0.090331 |
| температура | 0.146732 | -0.054060 | -0.064519 | -0.191805 | -0.062660 | 0.090331 | 1.000000 |

*Рисунок 3 – Фрагмент программного кода. Распределение и корреляция числовых признаков*

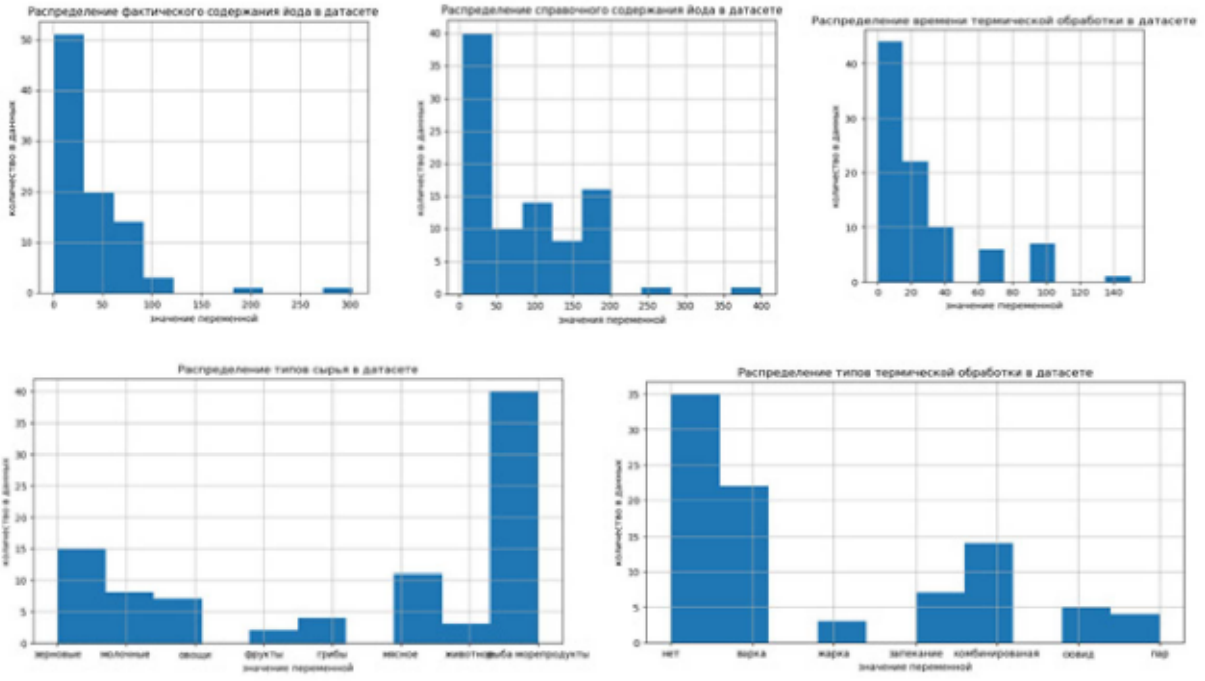



*Рисунок 4 – Фрагмент вывода программного кода. Распределения некоторых признаков в базе данных*

Распределения числовых факторов в базе данных не нормальное, что может значительно усложнить машинное обучение. Возможно, такое распределение данных связано с относительно небольшим их объемом и «реальным» характером. Не исключаем нормализации распределения переменных при дальнейшем увеличении объема лабораторных исследований.

Дополнительный анализ диаграмм представленных на рисунке 4 позволяет отметить следующие распределения значений изучаемых признаков для микронутриента йода 1..30 мкг на 100 г, время термической обработки 0…20 минут, тип сырья – морепродукты, вид тепловой обработки – без обработки / варка.

*2. Подготовка эмпирических данных к последующему машинному обучению.* Для применения машинного обучения необходимо провести кодировку категориальных признаков. В рамках данного исследования применяли 2 метода кодирования (рис. 5).

Для определенных моделей машинного обучения необходима определенная кодировка: для моделей Дерево решений и Случайный лес использовали *OrdinalEncoder*, для Линейной регрессии – *get_dummies*.

*3. Обучение моделей.* В качестве архитектуры для машинного обучения использовали нижеперечисленные модели:

– Линейная регрессия (*Linear Regression*).
– Дерево решений (*Decision Tree Regressor*).
– Случайный лес (*Random Forest Regressor*).

Отметим, что в качестве критериев выбора моделей для последующего машинного обучения использовали распространённость моделей для регрессионного прогноза.

В ходе обучения различных моделей были выявлены лучшие параметры моделей и результаты качества их прогнозов, которые представлены на рисунке 6.

OrdinalEncoder ⇐ Оригинал ⇒ get_dummies

| Тип сырья |
|---|
| 1 |
| 1 |
| 2 |
| 3 |

| Тип сырья |
|---|
| Зерновые |
| Зерновые |
| Молочные |
| Морепродукты |

| Тип сырья_зерновые | Тип сырья_молочные | Тип сырья_морепродукты |
|---|---|---|
| 1 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 1 |

*Рисунок 5 – Кодирование категориальных признаков*

Out[28]:

| | параметры | R2 | MAE | лучший результат на кросс валидации |
|---|---|---|---|---|
| **LinearRegression** | {'fit_intercept': False} | 0.907370 | 9.969810 | -33.242317 |
| **RandomForestRegressor** | {'max_depth': 16, 'n_estimators': 170} | 0.962361 | 4.536997 | -15.923447 |
| **DecisionTreeRegressor** | {'max_depth': 12} | 0.990708 | 1.781333 | -15.105056 |

*Рисунок 6 – Фрагмент программного кода. Показатели качества прогноза содержания йода на обучающей выборке различных моделей машинного обучения*

Сравнение спрогнозированных и фактических показателей у модели линейной регрессии показал удовлетворительный результат, однако выявил значительное отклонение почти в 10 мкг йода, что может быть связано с ненормальным распределением некоторых признаков.

При анализе прогнозных значений модели «Дерево решений» было выявлено, что коэффициент детерминации близок к идеальному, а отклонение составляет 2 мкг йода, что является положительным результатом.

При оценке качества прогноза на обучающей выборке у модели «Случайный лес» выявлено, что прогноз также является удовлетворительным, однако результат хуже, чем у модели «Дерево решений».

По результатам прогнозов на обучающей выборке в качестве основной модели выбрана модель «Дерево решений» («*max_depth*»: 12). Однако оценивать качество прогноза по полученным результатам не корректно, поскольку модель обучалась и затем сделала прогноз на одних и тех же данных. Для оценки ее деятельности необходимо спрогнозировать содержание йода на новых данных и сравнить полученные результаты с фактическими данными.

*4. Тестирование выбранной модели.* В качестве тестовой выборки использовали следующие данные, представленные в таблице 1, которые не были включены в обучающую выборку.

После кодировки данных моделью было спрогнозировано содержание йода в данных продуктах.

Спрогнозированное и фактическое содержание йода, сравнительный анализ результатов представлен в таблице 2.

*Таблица 1 – Данные для тестирования обученной модели*

| Наименование продукта | Йод, мкг | Белок, г | А, мкг | Е, мкг | тип сырья | подготовка сырья | тип термической обработки | Время, мин | Температура, °С | обогащение |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Печень вареная | 6,3 | 16,0 | 100 | 0,6 | мясное | нет | варка | 10 | 100 | нет |
| Тунец на пару | 50,0 | 24,4 | 20 | 0,2 | морепродукты | замороженное | пар | 20 | 95 | нет |
| Курица отварная | 4,0 | 19,7 | 0 | 0,0 | мясное | нет | варка | 20 | 100 | нет |
| Запеканка творожная обогащенная | 79,0 | 11,6 | 0 | 0,0 | молочные | нет | запекание | 30 | 160 | органическая |
| Горбуша запеченная | 50,0 | 20,5 | 30 | 1,5 | морепродукты | замороженное | запекание | 20 | 160 | нет |

*Таблица 2 – Сравнительная характеристика спрогнозированных и фактичесих данных*

| Наименование продукта | Фактическое содержание йода, мкг | Спрогнозированное содержание йода, мкг | Абсолютное отклонение |
|---|---|---|---|
| Печень вареная | 3,49 | 2,44 | -1,05 |
| Тунец на пару | 21,50 | 22,10 | 0,60 |
| Курица отварная | 0,60 | 1,00 | 0,40 |
| Запеканка творожная обогащенная | 60,80 | 58,36 | 2,44 |
| Горбуша запеченная | 34,70 | 34,97 | 0,27 |

Сравнительный анализ спрогнозированного содержания йода с фактически полученными данными показал незначительное расхождение со средним отклонением в 1 мкг йода, что подтверждает работоспособность модели. Однако для еще более точного прогноза необходимо расширить обучающую выборку.

**Обсуждение.** Традиционный подход к оценке пищевой ценности может осуществляется с использованием справочных данных химического состава, включая потери при разных способах кулинарной обработки, и/или фактической оценки содержания необходимых макро- и микронутриентов в сырье и продукции соответствующими инструментальными методами.

В случае применения для расчетов только справочных данных можно выделить следующие преимущества: быстрота вычисления значений пищевой ценности, практически отсутствуют финансовые затраты. Из недостатков можно отметить, прежде всего, степень точности (соответствия) полученных результатов вычислений фактическим значениям.

Применяя физико-химические методы для установления фактических значений пищевой ценности, с одной стороны, мы получаем самые точные результаты, характеризующие химический состав анализируемой пищевой продукции, с другой стороны, субъекту оценки потребуется наличии гораздо больших временных и финансовых ресурсов для реализации определения нутриентного состава. Указанные недостатки ограничивают частоту использования данной разновидности традиционного подхода определения пищевой ценности.

Предлагаемый алгоритм машинного обучения для прогнозирования химического состава пищевых продуктов на примере сформированной базы данных содержания йода, по сути, будет являться компромиссом между применением справочных данных и фактическим определением пищевой ценности.

Отметим, что фундаментальную основу алгоритма составляет машинное обучение, позволяющее в режиме реального времени дополнять базу данных, повышая степень точности прогнозирования химического состава с каждой новой введенной переменной.

На примере содержания йода (справочного, фактического) показаны функциональные возможности машинного обучения в области прогнозирования химического состава продуктов. Для данного микронутриента подобраны влияющие факторы, которые способны оказывать значимое влияние на уровень содержания и сохранности пищевого вещества при термической обработке пищевой продукции (табл. 3).

Полагаем, что в текущую версию базы данных для прогнозирования содержания йода в готовых к употреблению продуктах питания, в перспективе можно добавить новые влияющие факторы. Их перечень приводится во второй половине таблицы 3. К ним можно отнести нутриенты, которые напрямую не влияют на содержание йода в продукте, но положительно сказываются на его усвояемости, что может дополнительно повысить эффективность использования данного продукта для профилактики йододефицита.

Отметим важную особенность. Обученная модель способна прогнозировать содержание йода не только в продуктах питания, которые содержат нативный йод, но и в обогащенной продукции, оценивая сохранность дополнительно введенного йода.

*Таблица 3 – Характеристика влияющих факторов*

| Наименование влияющего фактора | Возможные значения влияющего фактора в текущей версии базы данных | Характеристика влияния на выбранный нутриент |
|---|---|---|
| Учтенные факторы при создании базы данных | | |
| Справочное содержание йода + количество йода, введенного с обогащающей добавкой | 4 – 400 мкг / 100 г | Справочное значение является отправной точкой (или базой) для прогнозирования содержания йода. |
| Справочное содержание белка | 0 – 34,9 г / 100 г | Йод – летучее соединение, которое при термической обработке активно выделяется в окружающую среду. Белок способен связывать йод, улучшая его устойчивость [26] |
| Справочное содержание витамина А | 0 – 250 мкг / 100 г | Витамин А способен улучшать усвояемость йода организмом и стимулирует выработку гормонов щитовидной железы, улучшает устойчивость йода [26] |
| Справочное содержание витамина Е | 0 – 16 мг / 100 г | Витамин Е ускоряет процесс преобразования йода и селена, улучшает устойчивость йода [26] |
| Тип сырья | Зерновые, фрукты, овощи, грибы, мясо, молочные | В ряде случаев фактическое содержание йода может существенно варьироваться в зависимости от типа сырья |
| Подготовка сырья | Пастеризация | Длительная термическая обработка негативно сказывается на содержание йода |
| | Заморозка | Приводит к нарушению клеточной структуры, что увеличивает потери йода при термической обработке |
| Тип термической обработки | На пару<br>Sous Vide<br>Жарка<br>Варка<br>Запекание<br>Комбинированная | Фактическое содержание йода в готовой продукции зависит от способа термической обработки. По результатам фактического определения йода проранжированы типы термической обработки по степени сохранности от максимального к минимальному: на пару – Sous Vide – жарка – варка – запекание. |
| Температура термической обработки | 0 – 200 °С | Чем выше температура термической обработки, тем выше потери йода (в условиях одного способа термической обработки). |
| Время термической обработки | 0 – 150 минут | Чем дольше по времени термическая обработка, тем больше йода выделяется в окружающую среду |
| Вид обогащающей добавки | Неорганическая<br>Органическая | Минеральные обогащающие добавки уступают в устойчивости органическим |
| Потенциально возможные (рекомендуемые) факторы для включения в базу данных | | |
| Справочное содержание селена | Участвует в синтезе гормонов щитовидной железы | |
| Справочное содержание кальция, цинка, витаминов группы В | Благоприятно сказываются на усвояемости организмом йода | |

Для расширения функциональных характеристик программного обеспечения можно рассмотреть возможность применения аналогичного подхода с использованием машинного обучения для прогнозирования содержания других нутриентов. Очевидны перспективы расширения использования данного алгоритма, в результате чего становится возможным осуществление комплексной оценки химического состава готовых к употреблению пищевых продуктов.

Для применения разработанного программного обеспечения на практике планируется разработка *web*-версии, которая позволит получить доступ к возможности прогнозирования йода на любом устройстве. Преимуществом данного решения является возможность актуализировать базу данных в режиме реального времени, улучшая качество прогноза с каждым новым объектом в обучающей выборке. В этой связи полагаем целесообразным приглашать к коллаборации отдельные научные коллективы для дополнения базы данных полученными ими верифицированными результатами по оценке фактического содержания микронутриента. Параллельно этому продуктивным направлением сотрудничества считаем использование результатов исследований аккредитованных испытательных лабораторий территориальных управлений Роспотребнадзора по субъектам Российской Федерации.

**Выводы.** В результате анализа разработанной базы данных для машинного обучения было выявлено, что обучающая выборка состоит из 11 влияющих на прогнозируемое значение содержания йода факторов, 1 целевого признака и 90 объектов. Большинство объектов имеют следующие значения признаков: фактическое содержание йода находится в пределах от 1 до 30 мкг на 100 г, справочное содержание от 1 до 40 мкг йода на 100 г, время термической обработки до 20 минут, тип сырья – морепродукты, вид тепловой обработки – без обработки / варка. Наибольшая корреляция фактического содержания йода установлена со справочным содержанием и содержанием витамина *E*.

В ходе подготовки данных к обучения определили целевой признак (фактическое содержание йода) провели кодировку категориальных данных, которая позволила обеспечить функциональность вектора машинного обучения.

В результате оценки качеств прогноза 3 обучен-

ных моделей (дерево решений, случайный лес, линейная регрессия) по коэффициенту детерминации и стандартному отклонению было выявлено, что наиболее точная предсказательная способность (значение показателей: 0,99 и 1,78 соответственно) у модели «Дерево решений» («*max_depth*»: 12).

Тестирование обученной модели показало, что на новых данных модель спрогнозировала содержание йода со средним отклонением 1 мкг в сравнении с фактическим. Диапазон стандартного отклонения на 5 объектах тестовой выборки составил от 0,27 до 2,44 мкг, что подтверждает функциональную жизнеспособность выбранной модели.

На примере сформированной базы данных показана перспективность применения методов машинного обучения в области химического состава и пищевой ценности продуктов питания.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Generated Artificial General Intelligence – The Philosophical Principle and Algorithm Example of Artificial General Intelligence // Artificial Intelligence and Robotics Research. – 2022. – Vol. 11, No. 04. – P. 368-386. – DOI 10.12677/airr.2022.114039. – EDN KGICOP.

2. Artificial intelligence: Problems and prospects of development / N.N. Skeeter, N.V. Ketko, A.B. Simonov [et al.] // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2020. – Vol. 1100. – P. 306-318. – DOI 10.1007/978-3-030-39319-9_34. – EDN MIWWFS.

3. Пудакова, В.Е. Методики использования искусственного интеллекта / В.Е. Пудакова, П.А. Кулаков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 4. – С. 303-306. – DOI 10.24412/2071-6168-2023-4-303-306. – EDN LOFTAL.

4. Bakumenko, M.A. Prospects for the development and application of artificial intelligence technologies in Russia / M.A. Bakumenko, A.V. Sigal, D.V. Titarenko // E3S Web of Conferences: XI International Scientific and Practical Conference Innovative Technologies in Environmental Science and Education (ITSE-2023), Divnomorskoe village, Russia, 04-10 сентября 2023 года. Vol. 431. – Divnomorskoe village, Russia: EDP Sciences, 2023. – P. 05036. – DOI 10.1051/e3sconf/202343105036. – EDN GANKBA.

5. Basic Artificial Intelligence Techniques: Evaluation of Artificial Intelligence Performance / J. Kalpathy-Cramer, J.B. Patel, C. Bridge, K. Chang // Radiologic Clinics of North America. – 2021. – Vol. 59, No. 6. – P. 941-954. – DOI 10.1016/j.rcl.2021.06.005. – EDN LJBHAE.

6. Корниенко, В.Ю. Общие сведения о машинном обучении и его применении для решения биологических задач / В.Ю. Корниенко, М.Ю. Минаев // Все о мясе. – 2021. – № 3. – С. 40-43. – DOI 10.21323/2071-2499-2021-3-40-43. – EDN GRAOPE.

7. Bibliometric analysis of artificial intelligence for biotechnology and applied microbiology: Exploring research hotspots and frontiers / D. Xu, B. Liu, J. Wang, Zh. Zhang // Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. – 2022. – Vol. 10. – DOI 10.3389/fbioe.2022.998298. – EDN OMGEMR.

8. Нигматуллин, В.Р. Использование методов машинного обучения и искусственного интеллекта в химической технологии. Часть 1 / В.Р. Нигматуллин, Н.А. Руднев // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2019. – № 4. – С. 243-268. – DOI 10.17122/ogbus-2019-4-243-268. – EDN VKEFMX.

9. Artificial intelligence in agriculture as a basis for increasing the competitiveness of Russian enterprises / B.A. Voronin, V.S. Kukhar, I.P. Chupina [et al.] // BIO Web of Conferences. – 2022. – Vol. 51. – P. 05003. – DOI 10.1051/bioconf/20225105003. – EDN XZUAPY.

10. Enabling smart agriculture by implementing artificial intelligence and embedded sensing / A. Sharma, M. Georgi, M. Tregubenko [et al.] // Computers & Industrial Engineering. – 2022. – Vol. 165. – P. 107936. – DOI 10.1016/j.cie.2022.107936. – EDN GXDJSJ.

11. Попова, А.В. Создание рационов питания на базе технологии машинного обучения в рамках разработки стартапа как диплома / А.В. Попова // Сборник трудов X Конгресса молодых ученых: Материалы Конгресса, Санкт-Петербург, 14-17 апреля 2021 года. Том 3. – Санкт-Петербург: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет ИТМО", 2021. – С. 222-224. – EDN FBACPQ.

12. Application of Artificial Intelligence in Food Industry-a Guideline / N.R. Mavani, J.M. Ali, S. Othman [et al.] // Food Engineering Reviews. – 2021. – DOI 10.1007/s12393-021-09290-z. – EDN MYKBEZ.

13. Артемова, Е.Н. Использование нейросетей для повышения качества обслуживания в ресторанном бизнесе / Е.Н. Артемова, А.С. Полунин // Управление качеством в образовании и промышленности: Сборник статей Всероссийской научно-технической конференции, Севастополь, 21-22 мая 2020 года / Редколлегия: Белая М.Н. (отв. ред.). – Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Севастопольский государственный университет", 2020. – С. 480-484. – EDN ATQATA.

14. Артемова, Е.Н. Нейросети как инструмент для решения задач на предприятиях питания / Е.Н. Артемова, А.С. Полунин, Н.М. Павлова // Приоритеты и научное обеспечение реализации государственной политики здорового питания в России: Материалы VI Международной научно-практической конференции, Орёл, 15-31 марта 2021 года. – Орёл: Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, 2021. – С. 328-332. – EDN TYHBHW.

15. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Кемеровской области – Кузбассе в 2021 году: Государственный доклад. – Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Кемеровской области – Кузбассу, 2022.

16. Погожева, А.В. Группы риска множественного дефицита витаминов и минеральных веществ среди населения /А.В. Погожева, В.М. Коденцова//Клиническое питание и метаболизм. 2020. – Т. 1. – № 3. – С. 137-143.

17. Аверьянова, И.В. Продуктовая корзина для Крайнего Севера: фактическое и нормативное потребление / И.В. Аверьянова, Ю.В. Барбарук, С.И. Вдовенко // Профилактическая медицина, 2021. – Т. 24. – № 3. – С. 82-86.

18. Руснак, Ф.И Особенность питания и обеспеченность витаминами и макроэлементами детей Арктической зоны // Управление дошкольным образовательным учреждением, 2024. – № 6. – С. 103-106.

19. Бурак, Л.Ч. Существующие способы обработки пищевых продуктов и их влияние на пищевую ценность и химический состав // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания, 2021. – № 3. – С. 59-73.

20. Николаева, М.А. Химический состав и пищевая ценность переработанных плодов и овощей /М.А. Николаева, О.А. Рязанова // Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов. – 2020. – № 3 (62). – С. 62-66.

21. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023623250 Российская Федерация. Фактическое содержание йода в продовольственном сырье и продуктах питания относительно справочных данных: № 2023623038: заявл. 21.09.2023: опубл. 27.09.2023 / А.Ю. Зирка, Л.А. Маюрникова, Н.И. Давыденко, А.А. Кокшаров; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кемеровский государственный университет». – EDN DPNQRF.

22. scikit-learn: machine learning in Python – scikit-learn 1.3.1 documentation [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://scikit-learn.org/stable/index.html (дата обращения: 20.05.2023).

23. Hastie, T., Tibshirani R., Friedman J. Chapter 15. Random Forests // The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. – 2nd ed. – Springer-Verlag, 2009. – 746 p. – ISBN 978-0-387-84857.

24. Bates D., Machler M., Bolker B., Walker S. Fitting linear mixed-effects models using lme4. J. Stat. Softw. 2015; 67:1-48. doi: 10.18637/jss. v067.i01.

25. Ершов Э.Б. Выбор регрессии максимизирующий несмещённую оценку коэффициента детерминации (рус., англ.) // Айвазян С.А. Прикладная эконометрика. – Москва: Маркет ДС, 2008. – Т. 12, вып. 4. – С. 71-83.

26. Трошина, Е.А. Профилактика заболеваний, связанных с дефицитом йода, в группах высокого риска их развития / Е.А. Трошина, Ф.М. Абдулхабирова, Е.Н. Скрынник // Consilium Medicum. – 2010. – Т. 12, № 6. – С. 17-20.

*Статья поступила в редакцию 11.10.2024*
*Статья принята к публикации 13.12.2024*

УДК 663.88:664.162.8
EDN: QGGLYG

# РАЗРАБОТКА РЕЦЕПТУР НАПИТКОВ ДЛЯ ДИЕТИЧЕСКОГО ЛЕЧЕБНОГО И ДИЕТИЧЕСКОГО ПРОФИЛАКТИЧЕСКОГО ПИТАНИЯ

© Автор(ы) 2024

SPIN: 6467-4041
AuthorID: 137645
ORCID: 0000-0001-7094-2026
**ГАВРИЛОВ Андрей Станиславович**, доктор фармацевтических наук, доцент, доцент кафедры фармации
*Уральский государственный медицинский университет*
*(620028, Россия, г. Екатеринбург, ул. Репина, д. 3, e-mail: gavrilov.usma@mail.ru)*
SPIN: 7039-7679
AuthorID: 1266752
ORCID: 0000-0002-1654-9095
**БОЛОТОВА Анна Викторовна**, старший преподаватель кафедры фармации
*Уральский государственный медицинский университет*
*(620028, Россия, г. Екатеринбург, ул. Репина, д. 3, e-mail: filimonovaann@yandex.ru)*
SPIN: 1652-0845
AuthorID: 706427
ORCID: 0000-0002-7666-4853
**МИННИХАНОВА Екатерина Юрьевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии питания
*Уральский государственный экономический университет*
*(620144, Россия, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта/Народной Воли, 62/45, e-mail: minnekaterina@yandex.ru)*
SPIN: 4388-7001
AuthorID: 704934
ORCID: 0000-0001-6765-7064
**ЛЕСНИКОВА Наталия Александровна**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии питания
*Уральский государственный экономический университет*
*(620144, Россия, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта/Народной Воли, 62/45, e-mail: lista507@rambler.ru)*

**Аннотация.** Темпы роста рынка продуктов здорового питания представляет собой наиболее динамично развивающийся сегмент в мире для разных групп населения. Быстрыми темпами развивается именно рынок безалкогольных напитков, к которым относятся морсы. Наиболее популярное сырье для изготовления морсов - это ягоды клюквы *Oxycóccus*, брусники *Vaccínium vítis-idaéa*, черной и красной смородины *Ribes nigrum*, *Ribes rúbrum*, облепихи *Hippóphae*. Цель исследования – разработка рецептур морсов на основе ягод, содержащих натуральные подсластители, обеспечивающие оптимальные органолептические и технологические свойства, отличающиеся фармакологической безопасностью, стабильностью при хранении в условиях закрытой упаковки при разном температурном режиме хранения. Органолептическую оценку качества морсов проводила группа дегустаторов (7 человек) на базе Единого лабораторного комплекса ФГБОУ ВО. Количественное содержание подсластителей – сукралозы, ребаудиозида-А, могрозиду-V проводили методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ). Установлено, что растворы (г/100 мл) ребаудиозида А и экстракта архата *Siraitia grosvenorii* (0,038 – 0,082 и 0,002 – 0,0400) соответственно обладают эквивалентной сладостью, равной 5,0 – 10,0 г сахара и горьким послевкусием, не более 2 балла (практически не чувствуется). Разработаны составы морсов без сахара и технология приготовления морсов без сахара, масс %: ягоды от 10 до 20, смесь натуральных подсластителей от 0,0191 до 0,0505 в том числе ребаудиозида А от 0,016 до 0,04 и экстракта архата *Siraitia grosvenorii* от 0,0031 до 0,0105, при соотношении ребаудиозида-А к могрозиду-V – от 9,3 до 12,6. Оценены органолептические, физико-химические свойства образцов морса, стабильность при различных температурных режимах хранения. Установлены сроки годности продукции при хранении при различных температурных режимах. Оценены органолептические и физико-химические свойства образцов морса, стабильность при различной температуре хранения, что позволило установить сроки годности образцов морса. Установлена экономическая эффективность замены сахара на натуральные заменители в сравнении с синтетическими (сукралоза).

**Ключевые слова:** подсластитель, сахар, морс, растительные компоненты, экономическая целесообразность.

# DEVELOPMENT OF BEVERAGE FORMULATIONS FOR DIETARY THERAPEUTIC AND DIETARY PREVENTIVE NUTRITION

© The Author(s) 2024

**GAVRILOV Andrey Stanislavovich,** doctor of pharmaceutical sciences, associate professor, associate professor of the Department of Pharmacy
*Ural State Medical University*

*(3 Repina str., Yekaterinburg, 620028, Russia, e-mail: gavrilov.usma@mail.ru )*
**BOLOTOVA Anna Viktorovna,** senior lecturer at the Department of Pharmacy
*Ural State Medical University*
*(3 Repina str., Yekaterinburg, 620028, Russia, e-mail: filimonovaann@yandex.ru )*
**MINNIKHANOVA Ekaterina Yurievna,** candidate of technical sciences,
associate professor of the Department of Food Technology
*Ural State University of Economics*
*(620144, Russia, Yekaterinburg, 8 Marta str./Narodnaya Volya, 62/45, e-mail: minnekaterina@yandex.ru )*
**LESNIKOVA Natalia Alexandrovna,** candidate of technical sciences,
associate professor of the Department of Nutrition Technology
*Ural State University of Economics*
*(620144, Russia, Yekaterinburg, 8 Marta str./Narodnaya Volya, 62/45, e-mail: lista507@rambler.ru)*

**Abstract.** The growth rate of the healthy food market is the most dynamically developing segment in the world for different groups of the population. The market of non-alcoholic beverages, which include fruit drinks, is developing rapidly. The most popular raw materials for the production of fruit drinks are cranberries *Oxycóccus*, lingonberries *Vaccínium vítis-idaéa*, black and red currants *Ribes* nigrum, *Ribes rúbrum*, sea buckthorn *Hippóphae*. The purpose of the study is to develop recipes for fruit drinks based on berries containing natural sweeteners that provide optimal organoleptic and technological properties, characterized by pharmacological safety, stability when stored in closed packaging at different storage temperatures. The organoleptic assessment of the quality of fruit drinks was carried out by a group of tasters (7 people) based on the Unified Laboratory Complex of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education. The quantitative content of sweeteners - sucralose, rebaudioside-A, mogroside-V was carried out by high-performance liquid chromatography (HPLC). It was found that solutions (g/100 ml) of rebaudioside A and Siraitia grosvenorii monk fruit extract (0.038 – 0.082 and 0.002 – 0.0400), respectively, have an equivalent sweetness of 5.0 - 10.0 g of sugar and a bitter aftertaste of no more than 2 points (practically not felt). The compositions of sugar-free fruit drinks and the technology for preparing sugar-free fruit drinks have been developed, mass %: berries from 10 to 20, a mixture of natural sweeteners from 0.0191 to 0.0505 including rebaudioside A from 0.016 to 0.04 and Siraitia grosvenorii monk fruit extract from 0.0031 to 0.0105, with a rebaudioside-A to mogroside-V ratio of 9.3 to 12.6. The organoleptic, physicochemical properties of the fruit drink samples, as well as their stability at various storage temperatures, have been assessed. The shelf life of the products during storage at various temperatures has been established. The organoleptic and physicochemical properties of the fruit drink samples, as well as their stability at various storage temperatures, have been assessed, which made it possible to establish the shelf life of the fruit drink samples. The economic efficiency of replacing sugar with natural substitutes in comparison with synthetic ones (sucralose) has been established.

**Keywords:** sweetener, sugar, fruit drink, vegetable components, economic feasibility.

*Для цитирования: Гаврилов А.С. Разработка рецептур напитков для диетического лечебного и диетического профилактического питания / А.С. Гаврилов, А.В. Болотова, Е.Ю. Минниханова, Н.А. Лесникова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 4(68). – С. 191-198. – EDN: QGGLYG.*

**Введение.** Сахар – это идеальный, универсальный источник энергии, необходимый для нормальной работы организма человека. Без сахара ухудшается кровоснабжение головного и спинного мозга. Недостаток сахара может приводить к сонливости, усталости, головокружению. Однако, избыточное употребление сахара может привести к необратимым нарушениям здоровья [1]. Установлена зависимость между высоким уровнем простых сахаров в ежедневном рационе и объёмом висцерального жира – наиболее опасного типа жира, приводящего к заболеваниям эндокринной и сердечно-сосудистой систем [2], сахарному диабету II типа. Потребление сахара в большом количестве снижает чувствительность периферических тканей к инсулину, который заставляет клетки поглощать глюкозу из крови. С точки зрения нейробиологии сахар может провоцировать возникновение депрессии [2]. Сахарный диабет 2 типа занимает высокие места среди всех эндокринопатий и является причиной многих осложнений для жизни человека. [3]. Воздействие различных внешних факторов физической, химической и биологической природы, а также внутренние процессы существования человеческого организма приводят к тому, что в организме начинают накапливаться свободные радикалы. Единственным способом снизить потребление сахара без изменения вкуса привычных блюд и напитков является его замена на подсластители [4]. Особенно актуальна эта проблема в больничном и санаторном питании.

Приказом Министерства здравоохранения РФ от 23 сентября 2020 г. № 1008н установлены правила организации лечебного питания на основе клинических рекомендаций и с учётом стандартов медицинской помощи, химического состава и энергетической ценности рационов лечебного питания. Лечебное питание назначается пациенту лечащим или дежурным врачом в соответствии с нозологической формой заболеваний по основному и (или) сопутствующему диагнозу. Однако приказом разрешено использование только сорбитола в качестве заменителя сахара в составе «Основной вариант

стандартной диеты (ОВД)» и «Вариант диеты 5 с пониженной калорийностью (низкокалорийная диета) (НКД)».

Сорбитол обладает значительным осмотическим эффектом в дозировке более 25 грамм в сутки [1]. Поэтому в пункте 12 части 4.4 статьи 4 ТР ТС 022/2011 маркировка пищевой продукции, в состав которой входят подсластители-сахароспирты, должна дополняться надписью: «Содержит подсластитель (подсластители). При чрезмерном употреблении может (могут) оказывать слабительное действие». Это является существенным недостатком сорбитола. В настоящее время на рынке имеется множество современных эффективных и безопасных заменителей сахара.

Наиболее перспективным решением, по нашему мнению, является использование натуральных ингредиентов: ребаудиозида-А и экстракта архата *Siraitia grosvenorii*, сохраняющие технологические свойства при температуре до 120°С [5].

В патентной литературе имеется множество рецептов напитков с добавлением экстрактов стевии и архата. Например, фруктовый сироп [6, 7], морс из яблок [8], клюквы [9, 10], брусники и других ягод [11-13]. Для стабилизации микробиологических и органолептических свойств все составы сиропов содержат значительные концентрации антиокислителей (гидросульфита натрия), усилителей вкуса, консервантов [14].

Основными преимуществами, представленных выше технических решений является пригодность для промышленного изготовления и расфасовки, стабильность полученных напитков в течение года. Основным недостатком данных напитков является сложный состав, присутствие большого количества вспомогательных веществ, стабилизаторов, консервантов, негативно влияющих на микрофлору желудочно-кишечного тракта [15].

**Методология.** Целью настоящей работы является разработка ягодных морсов без сахара, консервантов и стабилизаторов для лечебного и лечебно-профилактического питания, отличающихся фармакологической безопасностью, стабильностью при хранении в условиях закрытой упаковки с улучшенными органолептическими свойствами и полного соответствия требованиям нормативных документов.

Для решения поставленной цели было необходимо реализовать следующие задачи:

– разработать рецептуры приготовления морсов без сахара с высокими органолептическими показателями, оценить органолептические, физико-химические свойства образцов морса, стабильность в хранении при температуре от -18 С до +20-22°С.

– определить экономическую эффективность замены сахара на натуральные подсластители в сравнении с синтетическими (сукралоза).

В качестве объектов исследования в работе были использованы: модельные образцы морсов из клюквы и брусники, модельные образцы растворов подсластителей Ребаудиозида-А, экстракт архата *Siraitia grosvenorii*,, столовые подсластители «Сластея-М»: «Сластея-супер» – 15% сукралозы, 64% глицерина и 21% воды (ЕАЭС N RU Д-RU. РА01.В.08203/21).

Образцы морсов готовили традиционным способом: замороженную клюкву или бруснику дефростировали. Расчетные навески подготовленных ягод [16] протирали и отжимали сок. Мезгу заливали горячей водой, нагревали до кипения, выдерживали 5-8 минут, фильтровали через сито. Растворы подсластителей готовили следующим образом: навески экстракта архата, стевиозида растворяли в части горячей воды температурой до 60 °С, вводили в процеженный отвар клюквы или брусники, доводили до кипения, добавляли отжатый сок, вновь доводили до кипения и сразу охлаждали. Доводили массу до 1 литра прокипяченной водой.

Группа дегустаторов (7 человек) оценивала коллегиально вкус полученных растворов в сравнении с морсами с добавлением 10 % и горечь по пятибалльной шкале. Определение органолептических показателей – по ГОСТ 8756.1., ГОСТ 31986-2012. Определение массовой доли титруемых кислот (в пересчете на яблочную кислоту) – по ГОСТ 34127. Определение массовой доли осадка – по ГОСТ 8756.9. Определение содержания хинной и яблочной кислот – по ГОСТ Р 51239, ГОСТ Р 54744. Количественный анализ сукралозы [*USP-NF*] проводили на хроматографе жидкостном аналитическом «Agilent-1200» (США), оснащённый 4-х канальным градиентным насосом, проточным вакуумным дегазатором, автосамплером, детектором испаряющего светорассеяния (ELSD). Колонка «Phenomenex Luna C 18(2)» (США), 250×4,6 мм, 5 мкм. Температура колонки: 30 0 С. Элюент: 15 % ацетонитрил. Скорость потока элюента: 0,8 мл/мин. Объём пробы: 20 мкл. Параметры детектирования (ELSD): температура детектора 600С, чувствительность 6, фильтр 1. Стандартный образец сукралозы (Anhui Jinhe Industrial Co.,LTD с.25.11.2023).

Количественный анализ стевиозида – методом ВЭЖХ по ГОСТ Р ЕН 12856-2010: хроматограф жидкостный аналитический «Agilent-1100» (США), колонка: «Kromasil 100-5 C18 EKA(Швеция), 250×4,6 мм, 5 мкм, температура: комнатная, элюент: 70% метанола – 30%, 0,05 М водного раствора дигидрофосфата калия, режим элюирования: изократический, скорость потока 0,8 мл/мин, объём пробы: 20 мкл, детектор: DAD, длина волны 210 нм, ширина щели 8 нм.

Количественный анализ могрозида-V: хроматограф «Agilent-1100» (США), колонка: Acclaim™ Trinity™ P1 (3 µm), 2.1 × 100 mm (Thermo Scientific Dionex P/N 071389), температура: комнатная, элюент 81/19 ацетонитрил /10 mM раствор аммония формиата, *pH* = 3,0 скорость 0,3 mL/min. объем пробы 5 мкл, DAD, длина волны 210 нм, ширина щели 8 нм.

Стандартные образцы *Stevia Standards Kit*, (ChromaDex P/N KIT-00019566-005), Mogroside V standard (ChromaDex P/N ASB-00013881).

Микробиологический анализ: в соответствии с ТР ТС 021/20111 КМАФА-М, КОЕ; БГКП; патогенные м/о; дрожжи, плесени.

**Результаты.** На первой стадии экспериментальных работ готовили растворы подсластителей различной концентрации. Результаты оценки органолептических свойств представлены в таблице 1.

Математический анализ данных таблицы 1 («Statsoft»TM) (уравнения 1 и 2):

Сладость, г сахара = $145x+87y-109x^2-353xy-202y^2$ (1)

Горький привкус, балл = $11x-153y+156x^2+3829y^2$ (2)

где $X$ – концентрация ребаудиозида-А, $У$ – экстракта архата г/100 мл

Что позволило определить коэффициенты сладости Ребаудиозида-А 98% и экстракта архата *Siraitia grosvenorii* 40%: 145 и 87 г/г сахара. Интересно отметить отрицательный коэффициент горечи экстракта архата, что свидетельствует о необходимости совместного использования со стевиозидом. В результате органолептические свойства продукта значительно улучшаются. Это согласуется с данными литературы [17].

На рисунке 1 представлены контурные кривые постоянного уровня сладости и горечи растворов подсластителей.

Из рисунка 1 можно выделить область концентраций (г/100 мл) Ребаудиозида-А и экстракта архата *Siraitia grosvenorii* (0,038 – 0,082 и 0,002 – 0,0400) соответственно с эквивалентной сладостью, равной 5,0-10,0 г сахара и горьким послевкусием, не более 2 балла (практически не чувствуется).

*Таблица 1 – Влияние навески, г подсластителя на органолептические свойства морса (100 мл.) **

| № п/п | Ребаузиозид-А, 98% | Экстракт архата *Siraitia grosvenorii* | Сладость, эквивалент сахара, г (*) | Горечь, балл (**) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 0,0182 | 0,0027 | 5 | 2 |
| 2 | 0,0182 | 0,0155 | 6 | 2 |
| 3 | 0,0545 | 0,0027 | 16 | 5 |
| 4 | 0,0545 | 0,0155 | 17 | 5 |
| 5 | 0,0107 | 0,0091 | 4 | 0 |
| 6 | 0,0621 | 0,0091 | 17 | 4 |
| 7 | 0,0364 | 0,0000 | 10 | 3 |
| 8 | 0,0364 | 0,0181 | 12 | 3 |
| 9 | 0,0364 | 0,0091 | 10 | 2 |

*Примечание к таблице: (*) в сравнении с растворами сахарозы, %; (**) 1 – отсутствует, 2 – практически не чувствуется, 3 – ощущается, но не сильно, 4 – чувствуется горечь, 5 – горечь и послевкусие. Коллегиально, по общему мнению, 7 экспертов.*

**составлено авторами*

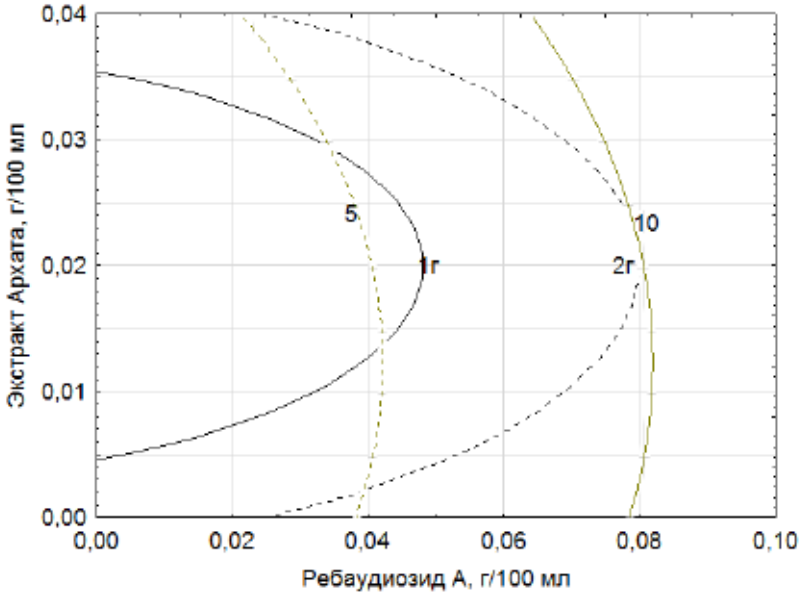



*Рисунок 1 – Контурные линии постоянного уровня влияния навески ребаудиозида-А и экстракта архата Siraitia grosvenorii на сладость в сравнении с 5-10% растворами сахарозы (кривые 5 и 10 соответственно) и горечь раствора: 1г – отсутствует, 2г – практически не чувствуется (составлено авторами)*

Следующей задачей было определение оптимального состава морса. В опытах варьировали массовую долю клюквы от 3 до 23%, ребаудиозида-А и экстракта архата *Siraitia grosvenorii*. Результаты представлены в таблице 2.

Данные таблицы 2 (оп. №№ 2-5) показывают, что предложенный состав, масс%: ягоды от 10 до 20, смесь натуральных подсластителей от 0,0191 до 0,0505 в том числе ребаудиозида-А от 0,016 до 0,04 и экстракта архата *Siraitia grosvenorii* от 0,0031 до 0,0105, при соотношении ребаудиозида-А к могрозиду-V – от 9,3 до 12,6 и способ приготовления, включающий стадии: дефростирования и перебора ягод, протирки и отжима ягодного сока, настаивания мезги при кипени в течении 5-8 минут, процеживания, добавления растворов навесок экстракта архата *Siraitia grosvenorii,* стевиозида, содержащего 98% ребаудиозида-А, смешивания процеженного отвара ягод, отжатого сока, подсластителя, доведения до кипения, охлаждения, доведения до массы прокипяченной водой, является оптимальным и позволяет получать морс, со сладостью, эквивалентной 5,0-10,0% раствору сахарозы, вкусом не менее 4,5 баллов по пяти бальной шкале и физико-химическим показателям, соответствующим действующей нормативной документации.

На следующей стадии экспериментальных работ исследовали стабильность физико-химических и органолептических показателей морса. Образцы клюквенного морса (таблица 2 опыт № 3) в упаковках ПЭТ бутылки по 200 мл устанавливали в холодильник при температурах -18°С, +2+8°С на 10, 30, 45 суток. Результаты приведены в таблице 3.

Из таблицы 3 видно, что срок годности продукции при хранении при комнатной температуре +18-+25°С – 2 суток, при хранении в холодильных шкафах и камерах при температуре (4±2)°С – 10 суток и при хранении в холодильных шкафах и камерах при температуре (-16±2)°С – 30 суток. Концентрация ребаудиозида-А при хранении при температуре (4±2)°С не изменяется в пределах допустимой погрешности +7%. Представленные на рисунках 2-5 хроматограммы образцов свидетельствуют об отсутствии дополнительных пиков в результате хранения. Это подтверждает стабильность ребаудиозида-А в условиях настоящего эксперимента.

В качестве контроля использовали клюквенный морс, содержащий 0,008 г/100 мл сукралозы. По результатам проведенного хроматографического исследования установлено, что содержание сукралозы в морсе «Клюква» за время хранения в течение 45 суток при температуре +2 + 8°С фактически не изменилось 0,0073+0,0007 и 0,0077+0,0007 г/100 мл. соответственно (рис. 6, 7). Натуральный заменитель сахара в виде смеси ребаудиозида-А с экстрактом архата (4:1) может быть заменой известному и, часто применяемому в пищевой промышленности заменителю сахара – сукралоза (рис. 8) [18].

*Таблица 2 – Влияние навески ингредиентов, г/100 г на вкус морсов**

| Опыт п/п, № | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Контроль |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Экстракт архата *Siraitia grosvenorii*, г, содержащий не менее 40% могрозидов, | 0,0015 | 0,0031 | 0,0046 | 0,0105 | 0,015 | |
| в том числе могрозид-V, г | 0,0006 | 0,00124 | 0,00184 | 0,0042 | 0,006 | |
| Ребаудиозид, г, содержащий, не менее ребаудиозида А 98%, | 0,01 | 0,016 | 0,0183 | 0,04 | 0,05 | |
| в том числе ребаудиозид-А, г | 0,0098 | 0,01568 | 0,01793 | 0,0392 | 0,049 | |
| Массовое соотношение могрозид-V/ребаудиозид-А | 16,3 | 12,6 | 9,7 | 9,3 | 8,1 | |
| Сумма натуральных подсластителей, г | 0,0115 | 0,0191 | 0,0229 | 0,0505 | 0,065 | Сахар, 10 |
| Клюква | 7 | 10 | 15 | 20 | 23 | 15 |
| Эквивалентная сладость,% (*) | 3,0 | 5,0 | 6,0 | 10 | 15 | 10 |
| Вкус, балл (**) | 3,0±1,5 | 4,5+0,5 | 4,5±0,5 | 5,0±0,0 | 4,5±0,5 | 5,0 |
| Массовая доля титруемых кислот (в пересчете на яблочную кислоту, % (не более 0,8) | 0,2±0,1 | 0,4±0,1 | 0,6±0,1 | 0,8±0,2 | 1,0±0,2 | 0,6±0,1 |
| Массовая доля осадка, % (не более 0,3) | 0,05±0,05 | 0,1±0,05 | 0,2±0,05 | 0,2±0,05 | 0,3±0,1 | 0,2±0,05 |
| Массовая доля хинной кислоты, г/дм$^3$ ( 5-13) | 3±1 | 5±1 | 9±1 | 11±2 | 13±2 | 11±1 |
| Массовая концентрация яблочной кислоты, г/дм$^3$ (6-14) | 4±1 | 6±1 | 11±1 | 14±4 | 16±4 | 11±1 |

*Примечание к таблице: (*) – в сравнении с раствором сахарозы соответствующей концентрации, средний по мнению каждого эксперта; (**): 3 – удовлетворительно, 4 – хорошо, 5 – отлично (среднее значение).*

**составлено авторами*

*Таблица 3 – Стабильность морса при хранении**

| Температура хранения, град. С | +20 | +20 | -18 | -18 | -18 | +2+8 | +2+8+ | +2+8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Срок годности, суток | 0 | 2 | 10 | 30 | 45 | 10 | 30 | 45 |
| Эквивалентная сладость,% (*) | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Вкус, балл (*) | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Массовая доля титруемых кислот (в пересчете на яблочную кислоту, % (не более 0,8) | 0,6±0,1 | 0,6+0,1 | 0,6±0,1 | 0,4±0,2 | 0,6±0,1 | 0,8±0,2 | 0,6±0,1 | 0,6±0,1 |
| Массовая доля осадка, % (не более 0,3) | 0,2±0,1 | 0,2±0,1 | 0,1±0,1 | 0,1±0,1 | 0,2±0,1 | 0,2±0,1 | 0,3±0,1 | 0,2±0,1 |
| Температура хранения, град. С | +20 | +20 | -18 | -18 | -18 | +2+8 | +2+8+ | +2+8 |
| Массовая доля хинной кислоты, г/дм$^3$ ( 5-13) | 9±1 | 10±1 | 11±2 | 9±1 | 9±1 | 11±2 | 9±1 | 11±1 |
| Массовая концентрация яблочной кислоты, г/дм3 (6-14) | 11±1 | 12±1 | 11±1 | 11±1 | 11±1 | 14±4 | 11±1 | 11±1 |
| Массовая концентрация ребаудиозида А, г/100 г | 0,0182 ±0,009 | 0,0184 ±0,007 | 0,0180 ±0,004 | 0,0182 ±0,009 | 0,0177 ±0,004 | 0,0188 ±0,009 | 0,0180 ±0,007 | 0,0179 ±0,007 |
| КМАФА-М, КОЕ'г, не более$5\times10^4$ | $2*10^1$ | $2*10^1$ | | $2*10^1$ | | | $9*10^1$ | $9*10^1$ |
| БГКП (коли-формы) (отсутствие) | отсутствуют | отсутствуют | | отсутствуют | | | отсутствуют | отсутствуют |
| Патогенные, в т.ч. сальмонеллы в 25 г, отсутствие | отсутствуют | отсутствуют | | отсутствуют | | | отсутствуют | отсутствуют |
| Дрожжи, плесени КОЕ/г, не более $5*10^1$ | менее $1*10^1$ | менее $1*10^1$ | | менее $1*10^1$ | | | менее $1*10^1$ | менее $1*10^1$ |

*Примечание к таблице: (*) – коллегиально, по общему мнению группы экспертов.*
**составлено авторами*

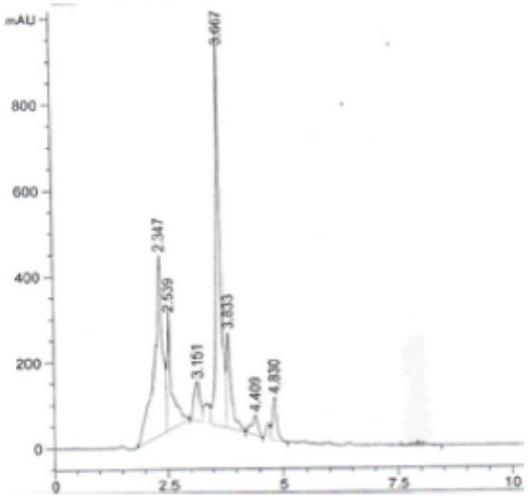



*Рисунок 2 – Морс брусники без ребаудиозида*

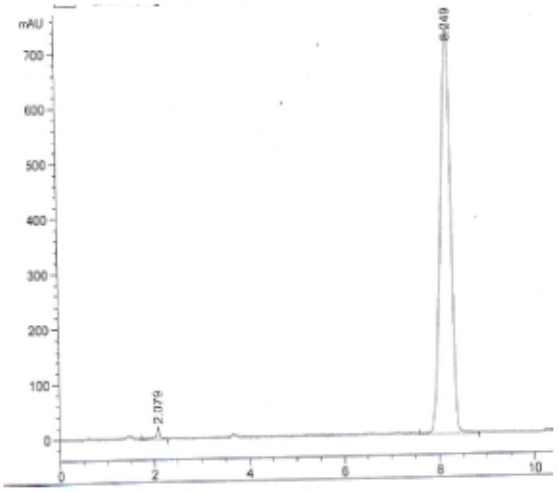



*Рисунок 3 – РСО Ребаудиозида (0,11 г в 50 мл)*

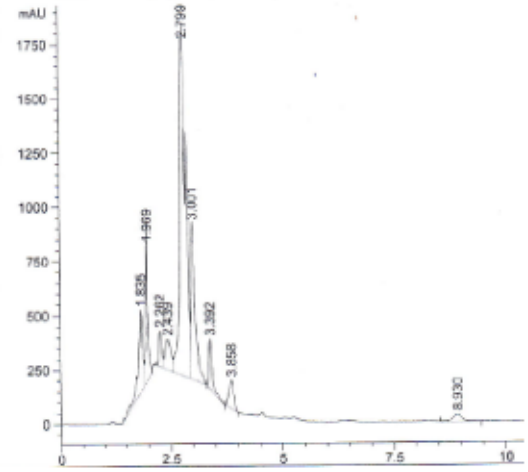



*Рисунок 4 – Морс брусники без сахара с натуральными подсластителями свежеприготовленный*

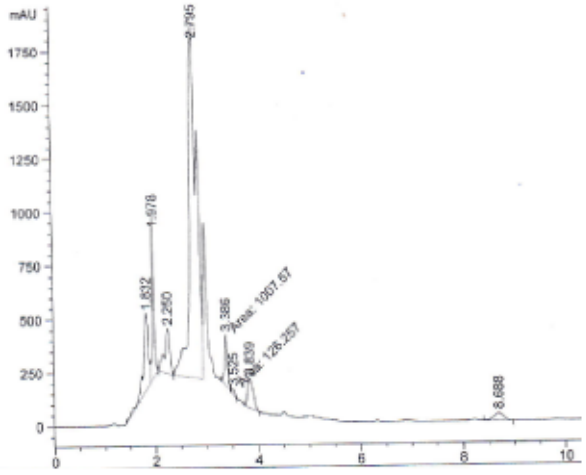



*Рисунок 5 – Морс брусники без сахара с натуральными подсластителями после хранения 45 суток +2+8 °С*

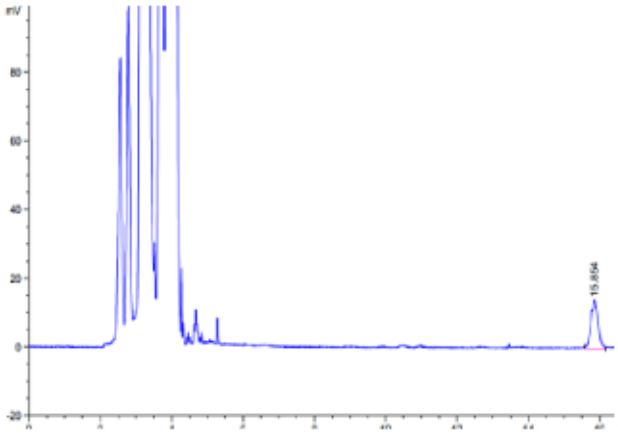


*Рисунок 6 – Морс брусника с сукралозой до хранения*

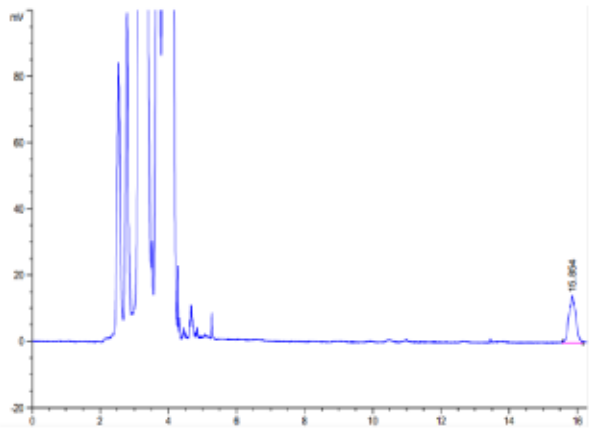


*Рисунок 7 – Морс клюква с сукралозой после хранения 45 суток +2+8°С*

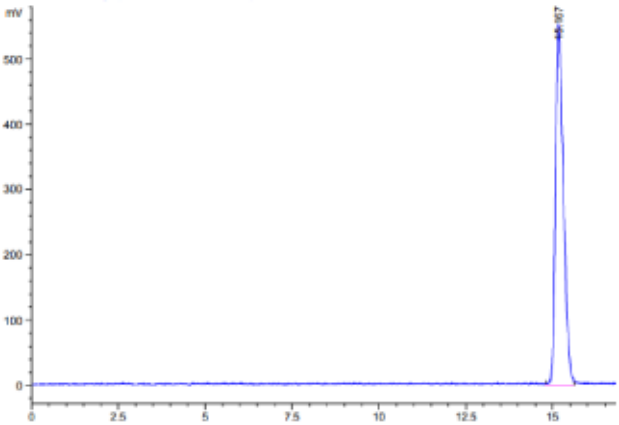


*Рисунок 8 – Стандартный раствор сукралозы 1,36 мг/мл*

Для сравнения экономической эффективности замены сахара на натуральный подсластитель использовали цены доступные в интернет-магазине Вайлдберриз. Из расчета на 1,0 л морса требуется 100,0 г сахара стоимостью 6,5 рублей (65 руб/кг×0,1=6,5 руб) или подсластителя «Стевия-архат» 1,6 г (4 стик пакета по 0,4 г) стоимостью 10,56 руб (528/200×4=10,56) или заменитель сахара сукралозы 80 мг/л или или 0,6 г/л 15% раствора «Сластея супер» стоимостью 1,37 руб (2380 руб/кг/10000,6=1,37).

Несмотря на существенное увеличение затрат на натуральный заменитель сахара в сравнении с перечисленными вариантами, разработанные морсы, во-первых, не содержит сахар, обладает пониженной калорийностью и, самое главное, содержат только натуральные ингредиенты.

**Обсуждение.** Установленное приказом МЗ № 395 н количество 30-60 г сахара в граммах (на одного человека в сутки) (9,7-19,4% калорийности суточной диеты), значительно превышает норму МР 2.3.1.0253-21 «Потребление добавленных сахаров для детей и взрослых не должно превышать 10% от калорийности суточного рациона. Для лиц с избыточной массой тела (ИМТ 25-29) и ожирением (ИМТ более 30) рекомендовано снижение потребления добавленных сахаров до уровня 5% от калорийности суточного рациона». Заменители сахара позволяют снизить калорийность, оставив неизменным сладкий вкус напитков и блюд при снижении их стоимости [19].

Промышленность предлагает огромное разнообразие заменителей сахара. Большинство из которых содержат в своем составе консерванты, негативно влияющие на микрофлору ЖКТ [18], эритрол, способствующий образованию тромбов [20, 21].

Предлагаем включить в перечень продуктов лечебного питания заменители сахара, без консервантов и вспомогательных веществ, натурального происхождения (предпочтительно) в количестве, 0,30 граммов (на одного человека в сутки) не более в пересчете на основное вещество.

**Выводы.** Методом математического моделирования экспериментов было изучено влияние ребаудиозида-А и экстракта архата *Siraitia grosvenorii* на органолептические свойства растворов. Было обнаружено, что растворы (г/100 мл) ребаудиозида-А и экстракта архата *Siraitia grosvenorii* (0,038-0,082 и 0,002-0,0400), соответственно, имеют эквивалентную сладость, равную 5,0-10,0 г сахара, и горькое послевкусие не более 2 баллов (практически не ощущается).

Изучено влияние состава морса на органолептические и физико-химические свойства морса. Были разработаны составы десертов без сахара

и технология приготовления десертов без сахара, мас.%: ягоды от 10 до 20, смесь натуральных подсластителей от 0,0191 до 0,0505, в том числе ребаудиозид-А от 0,016 до 0,04 и экстракт архата *Siraitia grosvenorii* от 0,0031 до 0,0105, с добавлением соотношение ребаудиозида-А и могрозида-В – от 9,3 до 12,6 и способ приготовления, включающий этапы: размораживание и сортировку ягод, протирание и отжим ягодного сока, настаивание мезги при кипени в течении 5-8 минут, процеживания, добавления растворов навесок экстракта архата *Siraitia grosvenorii*, стевиозида, содержащего 98% ребаудиозида-А, смешивания процеженного отвара ягод, отжатого сока, подсластителя, доведения до кипения, охлаждения, доведения до массы прокипяченной водой, является оптимальным и позволяет получать морс, со сладостью, эквивалентной 5,0-10,0% раствору сахарозы, вкусом не менее 4,5 баллов по пяти бальной шкале и физико-химическим показателям, соответствующим действующей нормативной документации.

Установлено, что срок годности образцов при хранении при комнатной температуре +18-25°С – 2 дня, при хранении в холодильных шкафах и камерах при температуре (4±2)°С – 10 дней и при хранении в холодильных шкафах и камерах при температуре (-16 ± 2) °С – 30 дней. Концентрация ребаудиозида-А при хранении при температуре (4±2)°С не изменяется в пределах допустимой погрешности в 7%.

Рассчитана экономическая эффективность замены сахара натуральными заменителями по сравнению с синтетическими (сукралоза). Показано, что замена сахара на 1,0 кг стоимостью 6,5 рублей натуральными подсластителями приводит к увеличению затрат до 10,56 рублей, что превышает этот показатель для сукралозы почти в 7 раз – 1,37 рубля.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Беляева М.А. Сахарозаменители в современной индустрии питания / М.А.Беляева, Т.И. Попеску // Инновации: перспективы, проблемы, достижения: материалы Пятой Междунар. науч.-практ. конф. (Москва, 17 мая 2017 г.). Berlin: West-Ost-Publishing House, 2017. – С. 260-267.

2. Бубнова М.Г. Роль ожирения и висцерального жира сердца в запуске сердечно- сосудистого континуума. Клинические эффекты орлистата [Текст] / М.Г. Бубнова // РМЖ. – 2014. – № 2. – С. 116.

3. Генделека Г.Ф. Использование сахарозаменителей и подсластителей в диетотерапии сахарного диабета и ожирения / Г.Ф. Генделека, А.Н. Генделека // Международный эндокринологический журнал. – 2013. – № 2 (50). – С. 34-38.

4. Тумашов А.А., Гаврилов А.С., Чугунова О.В., Булыгина О.Ю. Разработка мучных кондитерских изделий с пониженным содержанием сахара [Текст] / А.А. Тумашов, А.С. Гаврилов, О.В. Чугунова, О.Ю. Булыгина // Вестник МГТУ. – 2021. – № 4. – С. 428-440.

5. Минниханова Е.Ю. Перспективы применения интенсивных подсластителей в общественном питании / Е.Ю. Минниханова // Инновационные технологии в пищевой промышленности и общественном питании. Материалы VIII Международной научно-практической конференции. Екатеринбург. – 2021. – С.106-109.

6. Patent KR20200093798A South Korea. Manufacturing method of fruits syrup comprising stevia leaves extract: Appl. 2019-01-29: Publ. 2020-08-06.

7. Patent CN106805021A China. Sweetleaf chrysanthemum beverage: Appl. 2015-11-30: Publ. 2017-06-09.

8. Patent US2016166602A1 United States. Food Supplement Composition: Appl. 2014-12-12: Publ. 2016-06-16 / L. Sands.

9. Patent US2003203054A1 United States. Cranberry based dietary supplement and dental hygiene product: Appl. 2006-01-17: Publ. 2006-01-17 / J. Selzer, F. St. John.

10. Patent CN109170410A China. A kind of Cranberry fruit juice and preparation method thereof: Appl. 2018-11-16: Publ. 2019-01-11.

11. Patent WO2023215811A1 WIPO (PCT). Juice beverages with improved taste: Appl. 2023-05-04: Publ. 2023-11-09 / I. Prakash, J. Higiro.

12. Patent CA2656718A1 Canada. Non-nutritive sweetened beverages with lhg juice concentrate: Appl. 2013-02-05: Publ. 2013-02-05 / T. Lee, P. K. Chang. H. Chen.

13. Акимов М.Ю. 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.

14. Вяткин, А.В. Напитки антиоксидантной направленности как метод борьбы с окислительным стрессом / А.В. Вяткин, О.В. Чугунова // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. – 2016. – Т. 6. – № 4(19). – С. 119-126. – DOI 10.21285/2227-2925-2016-6-4-119-126.

15. Sara Jarmakiewicz-Czaja, Dominika Piątek, Rafał Filip The impact of selected food additives on the gastrointestinal tract in the example of nonspecific inflammatory bowel diseases [Текст] / Sara Jarmakiewicz-Czaja, Dominika Piątek, Rafał Filip // Arch Med Sci. 2021 Jan 8. № 18(5). – С. 1286-1296.

16. Ананина В.А., Ахиба С.Л., Лапшина В.Т., Мальгина Р.М., Соколов В.Л., Рубан А.П., Ясюченя З.И. / [Текст] // Сборник технологических нормативов для предприятий общественного питания и технологических рекомендаций для импортного сырья. Москва: Хлебпродинформ, 1996.

17. Заворохина Н.В. Исследование синергизма тройных смесей подсластителей, применяемых для низкокалорийных сладких блюд / Н.В. Заворохина, Е.Ю. Минниханова, О.В. Чугунова // Пищевая промышленность. – 2019. – № 9. – С. 66-69.

18. Omran, A. Differential Bacteriostatic Effects of Sucralose on Various Species of Environmental Bacteria / A. Omran, R. Baker, Ch. Coughlin // ISRN Toxicol. 2013. vol. 2013, Article ID 415070.

19. Vicki Wei Kee Tan, May Sui Mei Wee, Oliver Tomic, Ciarán G Forde Rate-All-That-Apply (RATA) comparison of taste profiles for different sweeteners in black tea, chocolate milk, and natural yogur [Текст] / Vicki Wei Kee Tan, May Sui Mei Wee, Oliver Tomic, Ciarán G Forde // J Food Sci. – 2020 Feb. – № 85(2). – С. 486-492.

20. Jones AD, Francis M Ngure, Gretel Pelto et al. What are we assessing when we measure food security? A compendium and review of current metrics. Advances in Nutrition: An International Review Journal. 2013. 4(5):481-505.

21. Lu Zhang, Haiyang Sun, Zihui Liu, Jiguo Yang, Yuanxiang Liu Association between dietary sugar intake and depression in US adults: a cross-sectional study using data from the National Health and Nutrition Examination Survey Текст] / Lu Zhang, Haiyang Sun, Zihui Liu, Jiguo Yang, Yuanxiang Liu // BMC Psychiatry. 2024 Feb.

*Статья поступила в редакцию 14.11.2024*
*Статья принята к публикации 13.12.2024*

УДК 331.44:331.45:631
EDN: AGPWUO

# ОБОСНОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ УРОВНЯ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА МЕХАНИЗАТОРОВ ПУТЕМ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕКОТОРЫХ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ОРГАНИЗМА

© Автор (ы) 2024

SPIN: 1176-1210
AuthorID: 368269
ORCID: 0000-0003-2526-9412
ScopusID: 57189602324

**ЕГОРОВА Ирина Викторовна,** кандидат технических наук,
доцент кафедры «Физическая культура, спорт и техносферная безопасность»
*Азово-Черноморский инженерный институт – филиал Донского государственного аграрного университета в г. Зернограде*
*(347740, Россия, Зерноград, улица Ленина, 21, e-mail: Orishenkoirina@mail.ru)*

SPIN: 1003-8910
AuthorID: 753858
ORCID: 0000-0003-0415-1925
ScopusID: 57208260649

**ГАЙДА Анна Станиславовна,** кандидат технических наук, доцент кафедры «Охрана труда»
*Луганский государственный аграрный университет имени К.Е. Ворошилова*
*(291008, Россия, ЛНР, г. Луганск, тер. ЛНАУ д.1, e-mail: annah1823@gmail.com)*

SPIN: 8695-2067
AuthorID: 873808
ScopusID: 57208263583

**ЛЫСЕНКО Сергей Григорьевич,** кандидат биологических наук, доцент кафедры «Охрана труда»
*Луганский государственный аграрный университет имени К.Е. Ворошилова*
*(291008, Россия, ЛНР, г. Луганск, тер. ЛНАУ д.1, e-mail: sergey.lysenko.1968@gmail.com)*

**Аннотация.** В статье рассмотрены особенности индивидуальных параметров организма (работоспособность, внимание, утомляемость) механизаторов (студенты 4 курса направление агроинженерия Луганского Аграрного Университета имени К.Е. Ворошилова в период прохождения производственной практики) в условиях угасающего и дифференцированное торможения, исследована их зависимость от силы нервной системы. По результатам исследования установили зависимость адаптивного уровня испытуемых с различной силой нервной системы к выполнению умственной работы. Выполненное исследование позволяет нам предположить, что испытуемые с сильной нервной системой лучше адаптированы к выполнению сложных умственных задач. Предпринята попытка проанализировать работоспособность и внимание механизаторов в зависимости от силы нервных процессов (параметры находились в прямой зависимости от силы нервной системы), при исследовании утомляемости наблюдали обратную зависимость. Данные отличия были более выражены в условиях угасающего торможения. Исследуемые параметры в условиях дифференцированного торможения были ниже, чем в условиях угасающего торможения, таким образом, что с одной стороны ведет к снижению работоспособности, утомляемости и других параметров высшей нервной деятельности (например, внимания), с другой стороны способствует росту рисков при организации безопасных условий труда механизаторов. Проявление дифференцированного торможения наблюдалось в прямой зависимости от силы нервных процессов. Полученные результаты имеют практическую направленность. Во время организации полевых работ (при планировании повышения физической и интеллектуальной нагрузки: мероприятия с высокими рисками опасностей; при организации монотонных, однообразно-длительных видов работ; при формировании низового управленческого звена и т.д.) рекомендуется учитывать параметры силы нервных процессов механизаторов.

**Ключевые слова:** безопасные условия труда, тип нервной системы, сила нервных процессов, работоспособность, внимание, угасающее торможение, дифференцированное торможение, механизатор, утомляемость, методики «тепинг-тест», деятельность.

# RATIONALE FOR INCREASING THE LEVEL OF LABOR SAFETY MECHANIZERS BY STUDYING SOME PHYSIOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE ORGANISM

© Author(s) 2024

**EGOROVA Irina Viktorovna,** candidate of technical sciences,
associate professor of the Department of Physical Education, Sports and Technosphere Safety
*Azov-Black Sea Engineering Institute - branch of the Don State Agricultural University in Zernograd*
*(347740, Russia, Zernograd, Lenin street, 21, e-mail: Orishenkoirina@mail.ru)*

**GAYDA Anna Stanislavovna,** candidate of technical sciences,
associate professor of the Department of Occupational Safety

*Lugansk State Agrarian University named after K.E. Voroshilov*
*(291008, Russia, LPR, Lugansk, LNAU area, 1, e-mail: annah1823@gmail.com)*
**LYSENKO Sergey Grigorievich,** candidate of biological sciences,
associate professor Department of Occupational Safety
*Lugansk State Agrarian University named after K.E. Voroshilov*
*(291008, Russia, LPR, Lugansk, LNAU ter. 1, e-mail:sergey.lysenko.1968@gmail.com)*

**Abstract.** The article considers the features of individual parameters of the organism (performance, attention, fatigue) of machine operators (4th-year students of the agricultural engineering department of the Lugansk Agrarian University named after K.E. Voroshilov during their industrial practice) under conditions of fading and differentiated inhibition, their dependence on the strength of the nervous system is investigated. According to the results of the study, the dependence of the adaptive level of subjects with different strength of the nervous system on the performance of mental work was established. The conducted study allows us to assume that subjects with a strong nervous system are better adapted to the performance of complex mental tasks. An attempt was made to analyze the performance and attention of machine operators depending on the strength of nervous processes (the parameters were directly dependent on the strength of the nervous system), while the study of fatigue observed an inverse relationship. These differences were more pronounced under conditions of fading inhibition. The parameters under study under conditions of differentiated inhibition were lower than under conditions of fading inhibition, so that on the one hand it leads to a decrease in performance, fatigue and other parameters of higher nervous activity (for example, attention), on the other hand it contributes to the growth of risks in the organization of safe working conditions for machine operators. The manifestation of differentiated inhibition was observed in direct dependence on the strength of nervous processes. The obtained results have a practical orientation. During the organization of field work (when planning an increase in physical and intellectual load: events with high risks of dangers; when organizing monotonous, monotonous-long types of work; when forming the lower management level, etc.) it is recommended to take into account the parameters of the strength of nervous processes of machine operators.

**Keywords:** safe working conditions, type of nervous system, strength of nervous processes, performance, attention, fading inhibition, differentiated inhibition, machine operator, fatigue, tapping test methods, activity.

*Для цитирования: Егорова И.В. Обоснование повышения уровня безопасности труда механизаторов путем исследования некоторых физиологических особенностей организма / И.В. Егорова, А.С. Гайда, С.Г. Лысенко // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 4(68). – С. 199-204. – EDN: AGPWUO.*

**Введение.** Создание безопасных условий труда – это кропотливая ежедневная работа на протяжении всего технологического процесса, во время которой необходимо учитывать тот факт, что каждый человек имеет индивидуальные параметры физиологических процессов и психической деятельности [1, 2].

Человек индивидуально адаптируется к новым, изменившимся условиям внешней и внутренней окружающей среды. Люди индивидуально проявляют себя в процессе обучения и овладения профессии, в экстремальных ситуациях, имеют свойственные только им склонности и способности. Индивидуальность напрямую зависит от особенностей нервной системы (далее – НС) человека. Важной характеристикой определяющей свойства НС есть ее тип (сильный, уравновешенный и подвижный) [3, 4].

Тип нервной системы с одной стороны является врождённым и составляет основу психической деятельности человека, влияет на скорость формирования черт характера, а с другой стороны находится в зависимости от внешних факторов (болезнь, утомляемость, стресс). Физические нагрузки способны влиять на формирование типа нервной системы [1, 5, 6].

Нужным показателем НС является сила нервных процессов. Данный параметр характеризует работоспособность нервных клеток и нервной системы в целом, раскрывает предел работоспособности нейронов [1, 7, 8].

В свою очередь под работоспособностью принято понимать потенциальную возможность организма (индивида, нервной клетки) выполнять нужный уровень нагрузки (физической, психической, функциональной) в течение определенного времени. Именно работоспособность определяет стойкость человека к различным видам утомления (физического, умственного и др.) и влияет на длительность качественного выполнения работы [8, 9].

Важным показателем нервной системы является процесс развития утомления, в основе которого лежит ослабление функционального состояния корковой динамики, снижение тонуса коры и истощение нервных процессов. Утомление носит функциональный характер и приводит к ослаблению работоспособности [2-5, 7-10].

Важным параметром высшей нервной деятельности (далее – ВНД) влияющим на работоспособность считается внимание, которое рассматривается, как направленность психической деятельности на изучение факторов, которые управляют выбором информации для восприятия. Для психологической разгрузки человеку важно уметь постоянно переключаться с непроизвольного на произвольное внимание, чередовать их. Это экономит энергию

человека, повышает его производительность труда и эффективность его деятельности, снижает психическое напряжение [11-16].

Цель работы – исследовать зависимость работоспособности и усталости от силы нервных процессов у механизаторов.

**Методология.** Исследовали группу – 20 юношей (студенты 4 курса направление агроинженерия Луганского государственного аграрного университета имени К.Е. Ворошилова в период прохождения производственной практики) возраста 20-21 года.

Порядок исследований для всего контингента испытуемых юношей проводился по одной и той же схеме и был следующим: сначала выполнялись простые задания – тестирование показателей работоспособности, усталости и внимания с помощью бланковых методик, затем изучались показатели силы основных нервных процессов при помощи методики «тепинг-тест». При выполнении работы стремились создать условия, которые приближены к естественным.

Для определения функциональных возможностей ВНД испытуемых использовали корректурные знаковые таблицы В. Анфимова. Мы исследовали умственную работоспособность (по скорости и точности выполнения заданий), измеряли скорость закрепления условных рефлексов, оценивали процессы условного и безусловного торможения. Определение функциональных возможностей высшей нервной включает две части: первая – угасающее торможение, вторая – дифференцированное торможение, которые состояли из четырех этапов, продолжительностью по 30 сек. (Общая продолжительность части исследования 120 сек.) [12, 17].

Умственную работоспособность оценивали по количеству обработанных знаков.

Внимание оценивали по количеству ошибок:

– низкое внимание – более 3,0 ошибок;

– среднее внимание – от 1,0 до 2,99 ошибок;

– высокое внимание – от 0 до 0,99 ошибок.

По результатам исследования рассчитывали следующие показатели: скорость (С), точность выполнения (А).

Исследование свойств нервной системы проводилось с помощью метода «тепинг-теста», который характеризует выносливость нервной системы по изменению во времени максимального темпа некоторых физиологических особенностей организма (движений кисти) и характеризует выносливость нервной системы [13, 18-25].

Тест длится 30 секунд, результаты записываются каждые пять секунд. Чтобы выполнить задания рисуют на листе бумаги шесть квадратов. В каждом квадрате как можно быстрее ставят точки карандашом в течение пяти секунд, переходя от одного квадрата к другому по часовой стрелке. Всё время работы необходимо прилагать максимальные усилия. Количество точек за первые 5 секунд принимается за исходный показатель.

Результаты теста оцениваются следующим образом:

– максимальный темп движений наблюдается в первые 10-15 секунд, затем показатель ниже исходного – это свидетельствует о сильной нервной системе;

– максимальный темп сохраняется на одном уровне в течение всего теста – это указывает на среднюю силу нервной системы;

– темп начинает снижаться с второго пяти секундного интервала – это признак слабой нервной системы;

– в первые 10-15 секунд темп стабилен, а затем снижается – это говорит о средне-слабой нервной системе;

– темп сначала снижается, затем возвращается к исходному уровню – это указывает на средне-сильную нервную систему.

**Результаты.** Обследование студентов инженерного факультета позволило выявить отличия по силе нервных процессов в группе, так 30% (6 чел.) имели средне-сильный уровень НС, по 20% (по 4 чел.) - сильный, средний, средне-слабый уровень НС и 10% (2 чел.) – слабый.

Средние параметры работоспособности в 1 части исследования (угасающего торможения) у юношей были 125,36±6,8 обработанных знаков, что соответствует высокому уровню. При этом в группах с сильной, средне-сильной и средней НС наблюдалась высокая умственная работоспособность – более 121 обработанных знаков, а в группах со средне-слабой и слабой НС – хорошая умственная работоспособность – от 101 до 120 обработанных знаков. Выявили достоверную разницу по работоспособности между сильной и слабой НС (табл. 1).

Средние параметры внимания при исследовании угасающего торможения у испытуемых были 0,86±0,159 ошибок, что соответствует высокому уровню. При этом в группах с сильной, средне-сильной и средней НС наблюдалось – высокое внимание – от 0 до 0,99 ошибок, а в группах со средне-слабой и слабой НС среднее внимание – от 1,0 до 2,99 ошибок.

Выявили достоверную разницу во внимании между сильной, средне-сильной, средней, средне-слабой группами НС и слабой НС (табл. 1).

Средняя скорость выполнения задания 1 части исследования у юношей находилась в пределах 4,14±0,05зн./с., что соответствует высокому уровню. При этом, в группах с сильной, средне-сильной, средней и средне-слабой НС наблюдалось – высокая скорость внимания – в диапазоне от 4,0-4,5 зн/с., а в группе со слабой НС средняя – 3,7зн/с. Наблюдали достоверную разницу по скорости и вниманию между сильной, средне-сильной, средней, средне-слабой группами НС с и слабой НС.

Точность выполнения задания в группах была выше нормы (табл. 1).

Средние параметры работоспособности во 2 части исследования (дифференцированное торможения) у юношей были 64,22±5,44 обработанных знаков, что соответствует высокому уровню для данной части исследования. При этом в группах с сильной, средне-сильной, средней, средне-слабой НС наблюдалась высокая умственная работоспособность – более 61 обработанных знаков, а в группах со и слабой НС – хорошая умственная работоспособность - от 51 до 60 обработанных знаков. Выявили достоверную разницу по работоспособности между сильной и слабой НС (табл. 2).

Средние параметры внимания при исследовании дифференцированного торможения у испытуемых были 1,92±0,52 ошибок, что соответствует среднему уровню. Достоверной разницы по этому параметру между группами не наблюдали (табл. 2).

Средняя скорость выполнения задания у юношей во второй части исследования находилась в пределах 2,14±0,032 зн./с. При этом наблюдалась значительная разница в скорости внимания в группах с сильной НС по сравнению с группой более слабой НС.

Точность выполнения задания в группах во 2 части исследования оставалась выше нормы (табл. 2).

*Таблица 1 – Разница между статистическими показателями внимания юношей 1 часть исследования – угасающее торможение в группах с разной силой нервных процессов (X±m)*

| НС / NS | сильная strong n=4 | средне-сильная medium-strong n=6 | средняя average n=4 | средне-слабая medium-weak n=4 | слабая weak n=2 |
|---|---|---|---|---|---|
| КЗ N S | 140,8 ± 5,26*** | 124,2 ± 7,55 | 123,0 ± 8,16 | 120,7 ± 7,00 | 118,1 ±6,04 |
| КО ER | 0,5± 0,153*** | 0,5± 0,136*** | 0,8 ± 0,15** | 1,0 ± 0,153** | 1,5 ± 0,203 |
| С C | 4,5 ± 0,04* | 4,3 ± 0,04* | 4,1 ± 0,02 | 4,1 ± 0,08 | 3,7 ± 0,05 |
| А A | 98,8 ± 0,21* | 97,6 ± 0,25 | 96,8 ± 0,18 | 97,6 ± 0,01 | 91,9 ± 0,02 |

*Примечания: КЗ – количество знаков обработанных; КО – количество ошибок; С – скорость зн/с.; А – точность выполнения задания (%); n – количество обследуемых; *** – p <0,001; * – p <0,05.*

*Таблица 2 – Разница между статистическими показателями внимания юношей 2 часть исследования – дифференцированное торможение в группах с разной силой нервных процессов (X±m)*

| НС / NS | сильная strong n=4 | средне-сильная medium-strong n=6 | средняя average n=4 | средне-слабая medium-weak n=4 | слабая weak n=2 |
|---|---|---|---|---|---|
| КЗ N of CP | 73,0 ± 4,73*** | 65,2 ± 6,09 | 63,8 ± 5,40 | 61,2 ± 5,69 | 57,9 ± 5,31 |
| КО ER | 2,0 ± 0,62* | 1,6 ± 0,45** | 2,0 ± 0,37* | 1,5 ± 0,32** | 2,5 ± 0,82 |
| С C | 2,4 ± 0,01* | 2,3 ± 0,05* | 2,1 ± 0,06 | 2,1 ± 0,01 | 1,8 ± 0,03 |
| А A | 93,3 ± 1,07* | 89,7 ± 1,05 | 87,3 ± 1,48 | 86,3 ± 0,99 | 80,9 ± 0,49 |

*Примечания: КЗ – количество знаков обработанных; КО – количество ошибок; С – скорость зн/с.; А – точность выполнения задания (%); n – количество обследуемых; *** – p <0,001; * – p <0,05.*

**Обсуждение.** В результате исследования наблюдали отличие работоспособности, утомляемости, объема внимания, скорости и точности выполнения задач между группами с сильной и слабой нервной системы. Работоспособность и внимание были больше в группах с сильной нервной системой, при исследовании утомляемости (по количеству ошибок) наблюдали обратную зависимость – в группе со слабой нервной системой. Это, вероятно, свидетельствует о том, что показатели ВНД находятся в зависимости от силы нервных процессов. Данные отличия были более выражены в условиях угасающего торможения.

Исследуемые параметры в условиях дифференцированного торможения были ниже, чем в условиях угасающего торможения. Это, возможно, указывает на то, что в условиях формирования дифференцированного торможения под воздействием дополнительного раздражителя (близкого по параметрам к условному сигналу, но не сопровождающегося подкреплением) возбуждаются дополнительные нервные центры, что влияет на время ответной реакции и снижает параметры внимания и работоспособности.

В ходе исследования установили различный адаптивный уровень испытуемых к выполнению умственной работы, что позволяет нам предположить, что студенты с сильной НС более адаптированы к выполнению сложных умственных задач.

Опираясь на результаты исследования, можно рекомендовать:

– при планировании повышения физической и интеллектуальной нагрузки работников (в период организации полевых работ) учитывать параметры их силы нервных процессов;

– так, как уровень внимания был выше в группах с сильной нервной системой, мероприятия с высокими рисками опасностей предусматривать для данной категории работников;

– при организации монотонных, однообразно-длительных видов работ (культивация, вспашка, покос, боронование и т.д.), способствующих накоплению утомляемости, отбирать группу механизаторов с более высоким уровнем силы нервной системы;

– при формировании низового управленческого звена во время выполнения полевых и подготовительных работ подбирать работников с сильной НС в условиях исследования дифференцированного торможения (данная категория работников в условиях дополнительных раздражающих факторов, при необходимости оперативного принятия решений обладают более высоким уровнем параметров ВНД, устойчивостью к утомлению).

Перспективами данных исследований являются направления, посвященные изучению закономерностей развития утомляемости. Помимо этого дальнейшего исследования требуют вопросы, посвященные исследованию характера изменений работоспособности и внимания в зависимости от интенсивности нагрузок (физических и умственных) в группах с различной подвижностью нервных процессов.

**Выводы.** При исследовании некоторых физиологических особенностей организма наблюдали: работоспособность и внимание были выше в группах с сильной НС; показатели утомляемости имели обратную зависимость, что указывает на обратную зависимость рисков производственного травматизма механизаторов от силы нервных процессов. Это, вероятно, свидетельствует о том, что показатели ВНД находятся в зависимости от силы нервных процессов. Данные отличия были более выражены в условиях угасающего торможения, это свидетельствует о том, что длительная монотонная работа (связанная с механизированной обработкой земли, уборкой урожая) влияет на уровень безопасности труда механизаторов в условии повышения работоспособности и увеличения утомляемости, и имеет обратную зависимость от силы НС.

Исследуемые параметры в условиях дифференцированного торможения были ниже, чем в условиях угасаю-щего торможения, таким образом, работа связана с использованием с различной интенсивностью разнообразных параметров НС. Это с одной стороны ведет к снижению работоспособности, утомляемости и других параметров ВНД (например, внимания), с другой стороны способствует росту рисков при организации безопасных условий труда механизаторов. Проявление дифференцированного торможения находится в прямой зависимости от силы НС. У испытуемых механизаторов с сильной НС наблюдали высшую степень адаптации к выполнению сложных умственных задач и нестандартных творческих заданий.

При организации полевых работ с высокими рисками опасностей, организации монотонных, однообразно-длительных видов работ (культивация, вспашка, покос, боронование и т.д.), планировании повышения интенсивности физической и интеллектуальной нагрузки, формировании низового управленческого звена во время выполнения полевых и подготовительных работ рекомендуется учитывать параметры силы нервных процессов механизаторов.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Серебрякова, Н.Г., Молош Т.В., Подашевская Е.И. Эргономические подходы при проектировании безопасных условий труда операторов сельскохозяйственной техники // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства: сборник научных трудов. Горки: БГСХА. – 2022. – Вып. 7. – С. 51-55.

2. Антропова М.В. Работоспособность обучающихся и ее динамика в процессе умственной деятельности. М.: Педагогика, 2017. – 251 с.

3. Борисов К.С. Внимание и память: монография / Под. ред. Н.Ф. Добрынина. М.: Прогресс. 2018. – 134 с.

4. Немов Р.С. Общая психология: Учебник и практикум для вузов. В 3 т. Том II. Книга 2. Внимание и па-мять. М.: Юрайт. – 2019. – 262 с.

5. Comparative Effects of Neurodynamic Slider and Tensioner Mobilization Techniques on Sympathetic Nervous System Function: A Randomized Controlled Trial / Papacharalambous C, Savva C, Karagiannis C, Paraskevopoulos E, Pamboris GM.J Clin Med. 2024 Aug 28;13(17):5098. doi: 10.3390/jcm13175098. PMID: 39274312 Free PMC article.

6. Bochkovskyi A.P., Sapozhnikova N.Y. Development of system of automated occupational health and safety management in enterprises // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. 2021. Vol. 107. No 1. P. 28-41. DOI: 10.5604/01.3001.0015.2454. EDN: VWLZGP.

7. Тургиев, А.К. Охрана труда в сельском хозяйстве. М.: Academia. – 2018. – 272 с.

8. Магамедзминова, М.М., Коротких В.М., Полякова С.Р., Осокина М.М. Признаки утомления и переутомления, их причины и профилактика // Молодой ученый. – 2020. – № 8 (298). – С. 74-75. URL: https://moluch.ru/archive/298/67584.

9. Агаджанян Н.А., Горшков М.М., Котельник Л.А., и др. Ваша работоспособность сегодня. М.: Советская Россия, 2020. – 462 с.

10. Копаев, В. Здоровье и работоспособность человека. М.: Знание, 2019. – 270 с.

11. Липкович И.Э., Псюкало С.П., Украинцев М.М., Егорова И.В., Петренко Н.В. Эргономические основы организации рабочих мест на предприятиях АПК с учетом требований безопасности на примере разборочно-моечного участка по ремонту двигателей. АгроЭкоИнфо. – 2024. – № 1 (61). DOI: 10.51419/202141106.

12. Kaushik V., Charpe N.A. Effect of Body Posture on Stress Experienced by Worker // Studies on Home and Community Science. – 2008. – Vol. 2. – № 1. – P. 1-5. DOI: 10.1080/09737189.2008.11885246.

13. Krasnov I.N., Krasnova A.Yu., Miroshnikova V.V., Tolstoukhova T.N. Energy saving in milk pasterization process with hydrodynamic heater use // Plant Archives. – 2018. – T. 18. – № 2. – P. 2593-2599. EDN: VOKZVV.

14. Swanberg J.E., Nichols H.M., Clouser J.M., Check P., Edwards L., Bush A.M., Padilla Ya., Betz G. Correction to: A Systematic Review of Community Health Workers' Role in Occupational Safety and Health Research // Journal of Immigrant and Minority Health. – 2018. – Vol. 20. – No 6. – P. 1532. DOI: 10.1007/s10903-018-0739-0. EDN: ANCDGJ.

15. Шестаков Ю.Г., Яковлева Е.В., Полехина Е.В., Алибекова И.В. Новые подходы к совершенствованию системы охраны труда // Вестник Орловского государственного аграрного университета. – 2013. – №1(40). – С. 213-216. EDN: PWZONZ.

16. Ibrahim D, Ahbouch A, Qadah RM, Kim M, Alrawaili SM, Moustafa IM.J. Impact of the Order of Movement on the Median Nerve Root Function: A Neurophysiological Study with Implications for Neurodynamic Exer-cise Sequencing. // Clin Med. 2024 Feb 5;13(3):913. doi: 10.3390/jcm13030913. PMID:

38337607 Free PMC article.

17. Alharmoodi BY, Arumugam A, Ahbouch A, Moustafa IM.Hong Kong Physiother J. Comparative effects of tensioning and sliding neural mobilization on peripheral and autonomic nervous system function: A random-ized controlled trial / 2022 Jun;42(1):41-53. doi: 10.1142/S1013702522500056. Epub 2022 Mar 17.PMID: 35782695 Free PMC article.

18. Carta G, Fornasari BE, Fregnan F, Ronchi G, De Zanet S, Muratori L, Nato G, Fogli M, Gambarotta G, Geuna S, Raimondo S. Biomedicines. Neurodynamic Treatment Promotes Mechanical Pain Modulation in Sensory Neurons and Nerve Regeneration in Rats. / 2022 May 31;10(6):1296. doi: 10.3390/biomedicines10061296.PMID: 35740318 Free PMC article.

19. Поликанова И.С., Леонов С.В. Психофизиологические и молекулярно-генетические корреляты утомления // Современная зарубежная психология. – 2016. – Т. 5. – № 4. – С. 24-35. DOI: 10.17759/jmfp.2016050403. EDN: YJLDKR.

20. Шабанов Н.И., Липкович И.Э., Петренко Н.В., Пикалов А.В., Егорова И.В., Гайда А.С. Эргономика и психофизиологические основы безопасности труда в агроинженерной сфере: монография. Зерноград: Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2018. – 262 с. https://ачии.рф/files/e44ff30e-aeb7- 45b2-9a41-80e6340c94b6.pdf.

21. Поликанова И.С. Леонов С.В. Психофизиологические и молекулярно-генетические корреляты утомления // Современная зарубежная психология. – 2016. – Т. 5. – № 4. – С. 24-35. DOI: 10.17759/jmfp.2016050403. EDN: YJLDKR.

22. Aitken B., MacMahon C. Shared demands between cognitive and physical tasks may drive negative effects of fatigue: a focused review // Frontiers in Sports and Active Living. – 2019. – Volume 1. – P. 45. DOI:10.3389/fspor.2019.00045.

23. Carroll, T.J., Taylor J.L., Gandevia S.C. Recovery of central and peripheral neuromuscular fatigue after exer-cise // Journal of Applied Physiology. – 2017. – Т. 122. – №. 5. – P. 1068-1076 DOI:10.1152/japplphysiol.00775.2016.

24. Cutsem J. Van, Marcora S., De Pauw K., Bailey S., Meeusen R., Roelands B. The Effects of Mental Fatigue on Physical Performance: A Systematic Review // Sports Medicine. – 2017. – Vol. 47. – No. 8. – P. 1569-1588. DOI: 10.1007/s40279-016-0672-0. EDN: DUCPYG.

25. Taylor, J.L, Amann M., Duchateau J., Meeusen R., Rice C.L. Neural contributions to muscle fatigue: from the brain to the muscle and back again // Medicine and science in sports and exercise. – 2016. – Т. 48. – №. 11. – P. 2294-2306. DOI: 10.1249/MSS.0000000000000923.

*Статья поступила в редакцию 02.10.2024*
*Статья принята к публикации 13.12.2024*

УДК 625.098
EDN: ESBVAR

# ОЦЕНКА КОМФОРТНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В РАЙОНЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

© Автор(ы) 2024

SPIN-код: 6257-5588
AuthorID: 979025
ORCID:0000-0002-2459-9017

**АФАНАСЬЕВА Татьяна Анатольевна**, кандидат технических наук,
Ассистент кафедры «Техносферная и экологическая безопасность»
*Санкт-Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I*
*(190031, город Санкт-Петербург, проспект Московский, дом 9, e-mail: tafanaseva@pgups.ru)*

SPIN-код: 8008-6365,
AuthorID: 126682
ORCID:0000-0001-8412-5457
Scopus ID: 57202816743
ResearcherID:H-4312-2015

**КОПЫТЕНКОВА Ольга Ивановна,** доктор медицинских наук, профессор
Профессор кафедры «Техносферная и экологическая безопасность»
*Санкт-Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I*
*(190031, город Санкт-Петербург, проспект Московский, дом 9, e-mail: 5726164@mail.ru)*

**Аннотация.** Стратегия развития транспортной инфраструктуры в России предполагает строительство новых железнодорожных путей, в том числе для высокоскоростного движения, а также увеличение скоростей движения по существующим путям, значительное увеличение грузо- и пассажирооборота, длины и веса поездов. Шум, генерируемый железнодорожным транспортом, становится причиной дискомфортных условий проживания граждан вблизи районов расположения линейных объектов транспортных систем. Проведенный всесторонний анализ нормативной и научной документации, а также исследования в этой области показали отсутствие комплексного подхода при определении комфортных и безопасных условий проживания населения. В работе предложен алгоритм технологической оценки комфортности и безопасности окружающей среды в районе расположения линейных объектов транспортных систем. Технология состоит из несколько этапов, позволяющих в дальнейшем использовать комплекс мероприятий, основанный на реальности его реализации. Этапы включают в себя: идентификацию источника; формирование информационной базы, характеризующей ситуацию; итерационный метод и расчеты для обоснования принятия решений; оценку эффективности за счет использования показателей риска воздействия шума на население. Применение комплекса мероприятий позволит достичь санитарно-эпидемиологического благополучия (комфортной среды обитания), а также акустической безопасности среды.

**Ключевые слова:** акустическое загрязнение, комфортность, безопасность, шумозащита, шумозащитные мероприятия, железнодорожный транспорт, скорость, нормативная документация.

# ASSESSMENT OF THE COMFORT AND SAFETY OF THE ENVIRONMENT IN THE AREA OF THE LOCATION OF LINEAR OBJECTS OF RAILWAY TRANSPORT SYSTEMS

© The Author(s)2024

**AFANASEVA Tatyana Anatolyevna**, candidate of technical sciences,
assistant of the Department of Technosphere and Environmental Safety
*St. Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander I*
*(9 Moskovsky Avenue, St. Petersburg, 190031, e-mail: tafanaseva@pgups.ru)*

**KOPYTENKOVA Olga Ivanovna**, doctor of medical sciences, professor,
professor of the of the Department of Technosphere and Environmental Safety
*St. Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander I*
*(9 Moskovsky Avenue, St. Petersburg, 190031, e-mail: 5726164@mail.ru)*

**Abstract.** The strategy for the development of transport infrastructure in Russia involves the construction of new railway tracks, including for high-speed traffic, as well as an increase in traffic speeds along existing tracks, a significant increase in cargo and passenger turnover, the length and weight of trains. The noise generated by rail transport causes uncomfortable living conditions for citizens near the areas where linear objects of transport systems are located. The analysis of normative and scientific documentation, as well as research in this area, has shown the lack of an integrated approach in determining comfortable and safe living conditions for the population. An algorithm for technological assessment of the comfort and safety of the environment in the area of the location of linear objects of transport systems is proposed. The technology consists of several stages that allow further use of a set of measures based on the reality of its implementation. The stages include: identification of the source; formation of an information base characterizing the

situation; iterative method and calculations to justify decision-making; evaluation of effectiveness through the use of indicators of the risk of noise exposure to the population. The use of a set of measures will allow to achieve sanitary and epidemiological well-being (comfortable living environment), as well as acoustic safety of the environment.

**Keywords:** acoustic pollution, comfort, safety, noise protection, noise protection measures, railway transport, speed.

*Для цитирования: Афанасьева Т.А. Оценка комфортности и безопасности окружающей среды в районе расположения линейных объектов транспортных систем / Т.А. Афанасьева, О.И. Копытенкова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 4(68). – С. 205-209. – EDN: ESBVAR.*

**Введение.** В Современных мегаполисах, крупных городских агломерациях жилая застройка не отвечает требованиям экологической безопасности, обусловлено это отсутствием свободных территорий и площадей под застройку, это в свою очередь приводит к невозможности обеспечить (для вновь строящихся жилых территорий), а для уже построенных невозможность отвечать требованиям экологической безопасности условий проживания населения, особенно в результате формирования сверхнормативного акустического воздействия в районах расположения вблизи объектов транспортных систем.

Выполнение «Транспортной стратегии» [1], уже на современном этапе привело к увеличению скорости грузового и пассажирского железнодорожного движения, что в свою очередь обусловило рост числа предъявления жалоб на сверхнормативный уровень шума. Так в 2021 году этот показатель составил 33% от общего количества жалоб населения на несоответствие условий проживания требованиям санитарного законодательства [2].

В настоящее время вопросам шумового загрязнения отводится все больше внимания, однако воздействие шума, не оценивается при определении комфортности жилой территории, что необходимо для обеспечения безопасных условий проживания населения.

Цель исследования: разработка схемы алгоритма технологической оценки комфортности и безопасности условий проживания населения, на территориях с повышенным акустическим воздействием от линейных объектов транспортных систем.

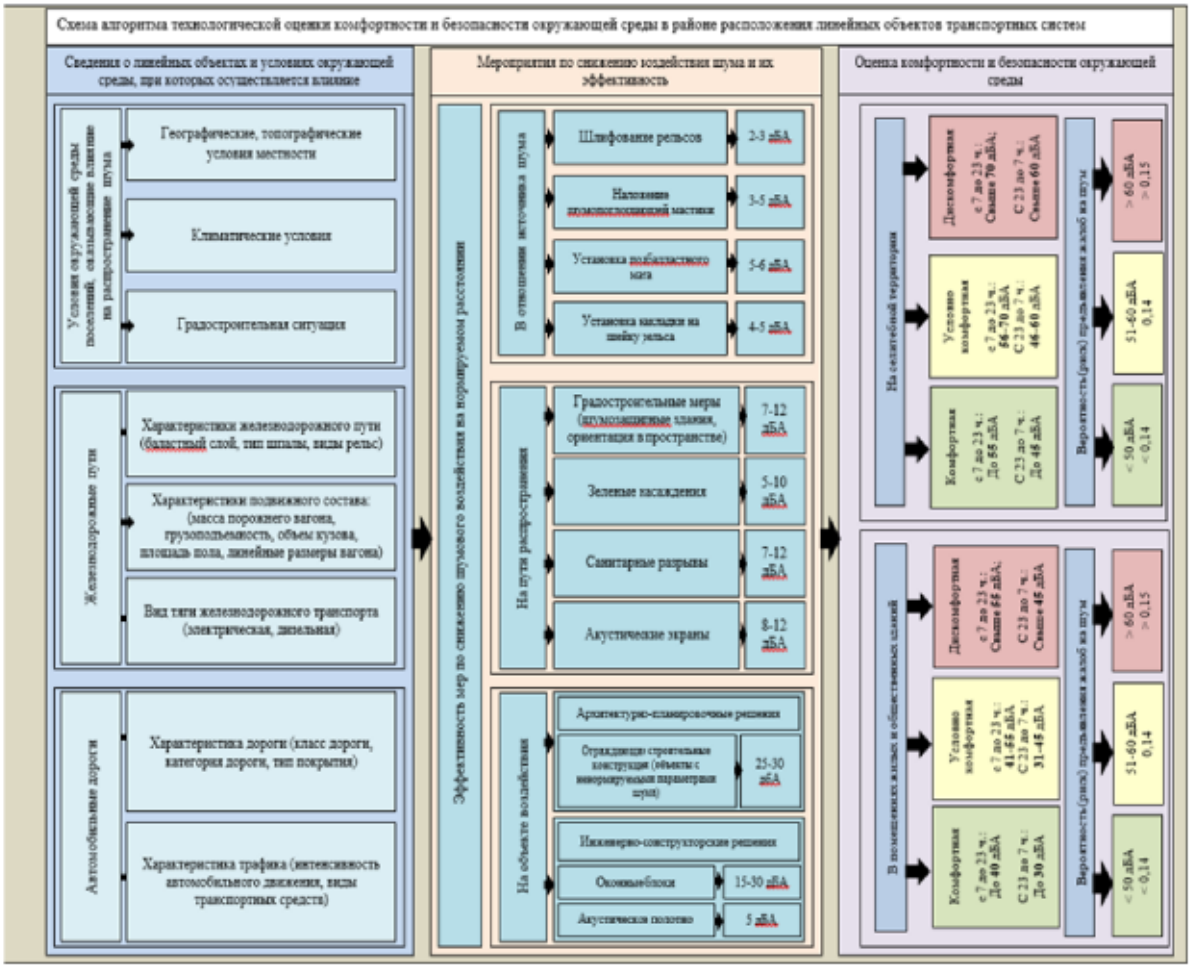
**Методология.** При проведении анализа нормативно-технической документации [3-7], а также исследований отечественных и зарубежных ученых [8-18], за основу брался транспортный шум, создаваемый железнодорожным транспортом и железнодорожными объектами транспортной инфраструктуры. Итогом рассмотрения данной проблематики стала возможность провести сравнительную оценку эффективности используемого в настоящее время комплекса шумозощитных мер (представлен в табл. 1).

*Таблица 1 – Комплекс шумозащитных мероприятий снижения железнодорожного транспортного шума*

| Источник шума | Наименование меры | Шумозащитное мероприятие | Эффективность | Источник |
|---|---|---|---|---|
| Меры борьбы | Ослабление интенсивности в источнике | Акустическое шлифование рельсов | 7-9 дБА<br>2 дБА | [7]<br>[18] |
| | | Вибродемпфирующие накладки на шейку рельса | 4-5 дБА<br>3 дБА | [7]<br>[18] |
| | | Нанесение на шейку рельса, тележку и колеса виброшумопоглощающей мастики | 7-8 дБА<br>3 дБА | [7]<br>[18] |
| | Ослабление на пути распространения | Шумозащитные экраны | 12 - 15 дБА<br>До 10 дБА | [7]<br>[18] |
| | | Земляные конструкции (вал, выемка) | 8 - 16 дБА<br>До 10 дБА | [7]<br>[18] |
| | | Зеленые насаждения | 5-10 дБА | [8]<br>[18] |
| | Снижение шума в жилых помещениях | шумозащитное остекление | 20 - 30 дБА<br>До 32 дБА | [7]<br>[18] |
| | | Шумозащитные оконные штор | 5 дБА | [14] |

Исследования проведены в соответствии с актуальной в настоящее время нормативно-технической документацией ГОСТ 23337-2014 на участках, вдоль линейных объектов железнодорожного транспорта [19]; Инструкцией 2.1.8.10-12-3-2005 «Оценка риска здоровью населения от воздействия шума в условиях населенных мест» [20], МР 2.1.10.0059-12 «Оценка риска здоровью населения от воздействия транспортного шума» [21].

**Результаты.** С целью обеспечения допустимой акустической нагрузки на территориях в районах размещения транспортной инфраструктуры и потоков железнодорожного транспорта разработана схема ее оценки (рис.1).




**Оценка комфортности и безопасности окружающей среды разработана в соответствии с МР 2.1.10.0059-12 и СанПиН 1.2.3685-21*

*Рисунок 1 – Схема оценки акустической нагрузки на территориях в районах размещения транспортной инфраструктуры*

Технология включает в себя несколько этапов. На первом этапе происходит идентификация и характеристика источника (линейный объект железнодорожного транспорта или автомобильного транспорта).

На втором этапе формируется информационная база, которая учитывает условия окружающей среды, климатические условия, градостроительную ситуацию (существующая жилая застройка или вновь застраиваемая территория) и топографические условия местности, которые характеризуют ситуацию. Дополнительно характеризуется качество и состояние железнодорожной или автомобильной трассы.

Из перечня существующих в настоящее время мероприятий итерационным методом, а также расчетами и натурными измерениями обосновываются наиболее эффективные мероприятия по снижению воздействия шума.

На заключительном этапе на основе расчета и анализа различных показателей риска (риска воздействия шума на население и риска предъявления жалоб) проводится оценка эффективности принятых решений. По результатам оценки эффективности принимается решение для вновь застраиваемых территорий или существующей жилой застройки.

Показатели комфортности разработаны на основе рекомендаций Всемирной организации здравоохранения по контролю шума для Европейского региона (2018 год) [18], с учетом результатов социологического опроса населения. Критерии позволяют создать шкалу оценки, включающую качественные характеристики: «комфортная», «условно-комфортная», «дискомфортная» (рис. 1) для оценки комфортности и безопасности.

**Обсуждение.** Анализ полученных результатов, позволил выделить и обосновать наиболее эффективные шумозащитные меры в районах функционирования железнодорожных транспортных потоков. Использование предложенной схемы оценки риска позволяет определить ущерб здоровью населения, проживающего в районах сверхнормативной акустической нагрузки и обосновать комплекс наиболее эффективных и доступных мероприятий, направленных на его снижение.

Расчеты показали, что акустическая нагрузка в жилом помещении в пределах нормативных значений (45дБА днем и 30 дБА ночью), формирует «приемлемый» риск развития патологических процессов – менее 0,05, и «приемлемый» риск предъявления жалоб населением – менее 0,02.

Акустическая нагрузка выше нормативных значений вызывает изменения в сердечно-сосудистой системе, когнитивных способностях, снижение внимания и скорости реакции человека [21]. Результаты проведенного опроса позволили установить, что: 64% респондентов, проживающих вблизи железнодорожных транспортных потоков, ощущают негативное воздействие акустической нагрузки, 72% респондентов отметили необходимость снижения уровня шума, 14% опрошенных не связывают возможное ухудшение самочувствия с акустической нагрузкой.

Экономическая оценка годового ущерба на основе стоимостной оценки социального ущерба от акустической нагрузки, превышающей норматив на 10 дБА [22], выполнена для участка территории с пятью 5-этажными домами серии 1-528. Результаты позволили установить, что ущерб (в ценах 2022 года), составляет 35 млн. рублей.

**Выводы.** Для обеспечения безопасных условий проживания на территориях с развитой транспортной инфраструктурой необходимо применять комплекс шумозащитных мероприятий, целесообразность которых обоснована оценкой величины акустической нагрузки, риском развития негативных изменений в здоровье населения, вероятностью предъявления жалоб и возможностью их практической реализации.

В целях оценки комфортности и безопасности окружающей среды в районе расположения линейных объектов транспортных систем целесообразно использовать методологию оценки риска от воздействия транспортного шума, которая позволяет учесть социальные эффекты негативного воздействия шума транспортных потоков (вероятность предъявления жалоб и вероятность раздражения на шум транспортных потоков).

Результаты исследования позволили разработать критерии оценки комфортности окружающей среды по уровню акустической нагрузки. Введены понятия «комфортная», «условно-комфортная», «дискомфортная», которые являются разработкой субъективной шкалы оценки комфортности и безопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Распоряжение Правительство Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. №3363-р. – Москва. «Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года». [Электронный ресурс] – Официальный интернет-портал правовой информации www.pravo.gov.ru, 03.12.2021, N 0001202112030006 Собрание законодательства Российской Федерации, N 50 (ч.IV), 13.12.2021, ст. 8613 – 285 с. – URL: https://mintrans.gov.ru/documents/8/11577 (дата обращения 01.03.2024).

2. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2021 году. Государственный доклад. – М.: Минприроды России; МГУ имени М. В. Ломоносова, 2022. – 684 с.

3. СП 51.13330.2011 Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003 (с Изменениями N 1-4): утв. 28 декабря 2010 г. № 825 [Электронный ресурс] – Доступ электронный фонд правовых и нормативно-технических документов Кодекс. – URL:https://docs.cntd.ru/document/1200084097 (дата обращения 01.03.2024).

4. СП 31-107-2004 Архитектурно-планировочные решения многоквартирных жилых зданий: утв. 12 мая 2004 г. № 03 [Электронный ресурс] – Доступ электронный фонд правовых и нормативно-технических документов Кодекс. – URL:https:// docs.cntd.ru/document/1200038763?section=text(дата обращения 25.08.2020).

5. СП 54.13330.2016 Здания жилые многоквартирные СНиП 31-01-2003: утв. 03 декабря 2016 г. № 883/пр [Электронный ресурс] – Доступ электронный фонд правовых и нормативно-технических документов Кодекс. – URL: https://docs.cntd.ru/document/456054198(дата обращения 25.08.2020).

6. ГОСТ 23166-2021. Конструкции оконные и балконные светопрозрачные ограждающие. Общие технические условия: утв. 19 мая 2021 г. № 398-ст [Электронный ресурс] – Доступ электронный фонд правовых и нормативно-технических документов Кодекс. – URL:https://docs.cntd.ru/document/12001796605?section=text(дата обращения 17.01.2022).

7. ГОСТ 33325-2015. Шум. Методы расчета уровней внешнего шума, излучаемого железнодорожным транспортом (с Поправкой, с Изменением N 1). – Утв. 18 июня 2015 г. № 47 [Электронный ресурс] - Доступ электронный фонд правовых и нормативно-технических документов Кодекс. – URL:https://internet-law.ru/gosts/gost/60732/(дата обращения 25.08.2020).

8. Бечина, Д.Н. Древесно-кустарниковая растительность в городских условиях и ее влияние на снижение шума от автотранспорта: На примере города Саратова: дис…кандидата биологических наук: 03.00.16/ Бечина Диана Николаевна - Саратов, 2006. – 169 с.

9. Иванов, Н.И. Снижение шума подвижного состава железнодорожного транспорта в источнике образования и на пути распространения/ Н.И. Иванов, Д.А. Куклин, П.В. Матвеев, А.Ю. Олейников// защита от шума и вибрации, Сборник докладов V Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. под редакцией Н.И. Иванова. – Санкт-Петербург – 2015 – С.125-144.

10. Куклин, Д.А. Влияние шлифования рельсов на внешний шум поездов/ Д.А. Куклин, П.В. Матвеев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук –2014. – Т. 16. – №1(7). – С. 1899 – 1907.

11. Шабарова А.В., Сравнение методов расчета распространения шума железнодорожного транспорта в различных типах застройки/ А.В. Шабарова, Буторина М.В., Куклин Д.А. // NOISE THEORY AND PRACTICE. - 2022. – Том 8. – № 3 (30). – С. 16-33.

12. Куклин, Д.А. Проблема снижения внешнего шума поездов в источнике и на пути распространения: автореферат дис. ... доктора технических наук: 01.04.06/ Куклин, Денис Александрович – Санкт-Петербург, 2016. – 48 с.

13. Басовский Д.А., Копытенкова О.И., Зайцев А.А., Востриков О.В.Технологии снижения шумовых и вибрационных нагрузок от трамвая в городе //Путь и путевое хозяйство. – 2024. – № 5. – С. 25-27.

14. Леванчук, А.В. Гигиеническое обоснование методов снижения акустической нагрузки в жилых помещениях/ А.В. Леванчук, О.И. Копытенкова, Т.А. Афанасьева // Здоровье населения и среда обитания. – 2020. – №10 (331). – С.46-51.

15. Афанасьева, Т.А. Основные направления решения проблем, связанных с акустической нагрузкой в городской среде с развитой транспортной инфраструктурой / Т.А. Афанасьева, Л.А. Леванчук, П.А. Ганичев // Здоровье – основа человеческого потенциала: проблемы и пути их решения. – 2021. – Том 16 № 1. – С. 150-172.

16. Афанасьева, Т.А. Способы снижения акустической нагрузки транспортных систем на территории городских поселений / Т.А. Афанасьева, А.В. Леванчук // Матер. Междунар. науч.-практич. конф. «ОБЩЕСТВО – НАУКА – ИННОВАЦИИ» (07 февраля 2022г., г. Казань). – Уфа: OMEGA SCIENCE. - 07.02.2022. С. 11-14.

17. Васильев, В.А. Подходы к нормированию шума

в Европе и России / В.А. Васильев, В.К. Васильева, А.Е. Шапурин // В сборнике: Защита от повышенного шума и вибрации. Сборник трудов конференции IX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Санкт-Петербург, 2023. – С. 47-52.

18. Европейское руководство по контролю шума/ Всемирная орг. здравоохранения, Европейское региональное бюро. – Copenhagen: Всемирная орг. здравоохранения, Европейское региональное бюро, cop. 2018. 181 с. ISBN:978-92-890-5356-3.

19. ГОСТ 23337-2014. Шум. Методы измерения шума на селитебной территории и в помещениях жилых и общественных зданий (с Поправкой). – Утв. 30 сентября 2014 г. № 70-П [Электронный ресурс] - Доступ электронный фонд правовых и нормативно-технических документов Кодекс. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200114242 (дата обращения 25.08.2020).

20. Постановление Главного государственного санитарного врача РБ № 20 от 22.02.2005. Об утверждении Инструкции 2.1.8.10-12-3-2005 "Оценка риска здоровью населения от воздействия шума в условиях населенных мест".

21. МР 2.1.10.0059-12 Оценка риска здоровью населения от воздействия транспортного шума от 23 марта 2012 [Электронный ресурс] - Доступ электронный фонд правовых и нормативно-технических документов Кодекс. – URL: https://docs.cntd.ru/document/ 1200095849?section=text (дата обращения 18.10.2021).

22. ОДМ 218.2.013-2011 Методические рекомендации по защите от транспортного шума территорий, прилегающих к автомобильным дорогам. – Утв. 13.12.2012 г. N 995-р [Электронный ресурс] - Доступ электронный фонд правовых и нормативно-технических документов Кодекс. – URL: https://docs.cntd.ru/ document/1200096658?section=text (дата обращения 18.10.2021).

*Статья поступила в редакцию 23.09.2024*
*Статья принята к публикации 13.12.2024*

УДК 502/504
EDN: FOTTKT

# АНАЛИЗ НОРМАТИВНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПО ОРГАНИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЮ ПРИРОДООХРАННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ ПРИ ПРЕДОТВРАЩЕНИИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ОТ РАЗЛИВОВ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ

© Автор(ы) 2024

SPIN: 8314-6251
AuthorID: 620707
ORCID: 0000-0002-7181-2845

**ГОЛОВАЦКАЯ Леся Ивановна,** кандидат технических наук, доцент,
профессор кафедры «Математические и естественнонаучные дисциплины»
*Каспийский институт морского и речного транспорта им. ген.-адм. Ф.М. Апраксина – филиал Волжского государственного университета водного транспорта*
*(603950, Россия, город Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: lesy_g@mail.ru)*

**Аннотация.** В обзоре рассмотрены нормативные документы и литературные источники с целью актуализации вопросов оценки загрязнения окружающей среды от разливов нефти и нефтепродуктов. Целью статьи является анализ нормативного обеспечения по организации и управлению природоохранной деятельностью при предотвращении загрязнения окружающей среды от разливов нефти и нефтепродуктов. Задачи. Провести анализ нормативных документов и литературных источников по оценке воздействия на окружающую среду, учету общественных предпочтений и минимизации негативных воздействий, а также по организации мероприятий и требованиям к силам и средствам постоянной готовности для предупреждения и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов. Методика и результаты. При анализе нормативных документов и литературных источников были рассмотрены: процедура проведения оценки воздействия на окружающую среду, требования и процедуры для учета общественных предпочтений и минимизации негативных воздействий, порядок организации мероприятий и требования к составу сил и средств постоянной готовности, предназначенных для предупреждения и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов. Рассмотрены ключевые факторы воздействия на окружающую среду от нефтяных разливов и их влияние. Выделены главные компоненты предупреждения и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов. Представлена схема системы нормативно-правовых актов, используемых при реализации плана ликвидации разливов нефтепродуктов в море. В результате проведенного анализа была обоснована необходимость тщательной переработки, анализа и построения единой информационно-аналитической системы по предупреждению и ликвидации разливов нефти, что приведет к повышению эффективности и надежности систем предупреждения и ликвидации разливов, а также позволит оперативно реагировать на чрезвычайные ситуации.

**Ключевые слова:** негативное воздействие на окружающую среду, оценка экологической опасности, оценка воздействия, окружающая среда, нормативно-правовое обеспечение, загрязнение нефтепродуктами.

# ANALYSIS OF REGULATORY SUPPORT FOR THE ORGANIZATION AND MANAGEMENT OF ENVIRONMENTAL PROTECTION ACTIVITIES IN THE PREVENTION OF ENVIRONMENTAL POLLUTION FROM OIL AND PETROLEUM PRODUCT SPILLS

© The Author(s) 2024

**GOLOVATSKAYA Lesya Ivanovna,** ph.d. in engineering science, associate professor,
professor of the Department of Mathematics and Natural Sciences
*Caspian Institute of Sea and River Transport named after Gen.-Adm. F. M. Apraksin is a branch of Volga State University of Water Transport*
*(603951, Russia, Nizhny Novgorod, Nesterova street, 5, e-mail: lesy_g@mail.ru)*

**Abstract.** The review examines regulatory documents and literature sources in order to update the issues of environmental pollution assessment from oil and petroleum product spills. The purpose of the article is to analyze the regulatory support for the organization and management of environmental protection activities in preventing environmental pollution from oil and petroleum product spills. Tasks. To analyze regulatory documents and literature sources on environmental impact assessment, taking into account public preferences and minimizing negative impacts, as well as on the organization of events and requirements for forces and means of constant readiness for the prevention and elimination of oil and petroleum product spills. Methodology and results. When analyzing regulatory documents and literature sources, the following were considered: the procedure for conducting an environmental impact assessment, requirements and procedures for taking into account public preferences and minimizing negative impacts, the procedure for organizing events and requirements for the composition of forces and means of constant readiness designed to prevent and eliminate oil and petroleum product spills. The key environmental impact factors from oil spills and their impact are considered. The main components of oil and petroleum product spill prevention and response are highlighted. The scheme of the system of normative legal acts used in the implementation of the plan for the elimination of oil spills at sea is presented. As a result of the analysis, the need for thorough processing, analysis and construction of a unified information and ana-

lytical system for the prevention and elimination of oil spills was justified, which will lead to an increase in the efficiency and reliability of spill prevention and elimination systems, as well as allow for prompt response to emergency situations.

**Keywords:** negative impact on the environment, environmental hazard assessment, impact assessment, environment, regulatory support, pollution by petroleum products.

*Для цитирования: Головацкая Л.И. Анализ нормативного обеспечения по организации и управлению природоохранной деятельностью при предотвращении загрязнения окружающей среды от разливов нефти и нефтепродуктов / Л.И. Головацкая // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 4(68). – С. 210-216. – EDN: FOTTKT.*

**Введение.** Загрязнение окружающей среды является серьезной проблемой, которая оказывает негативное влияние на жизнь людей и экосистемы [1-5]. В условиях быстрого развития морской экономики в прибрежных районах чрезмерное вмешательство в морскую среду и ее разрушение в результате нерациональной хозяйственной деятельности человека привели к обострению техногенных морских катастроф по всему миру. Исследования, проведенные на молекулярном уровне, раскрывают основные механизмы, связывающие воздействие загрязняющих веществ с патогенезом сердечнососудистых заболеваний [6]. Разливы нефти и нефтепродуктов представляют собой одну из самых опасных форм загрязнения окружающей среды [7-10]. Они могут происходить как в результате случайных аварий, так и преднамеренных действий, таких как слив отходов с судов [11]. Время существования нефтяного пятна от разлива нефти с судна зависит от большого количества факторов, в том числе от количества разлитой нефти, условий морской среды и климатических условий. Небольшие разливы могут естественным образом рассеяться и испариться в течение нескольких часов или дней, поэтому сложно определить время разлива нефти с судна. В связи с этим постоянно проводятся исследования морских происшествий с целью улучшения безопасности морского судоходства и минимизации вреда для окружающей среды [12-15]. По данным Международной федерации владельцев танкеров, с 1970 по 2022 год в океаны было сброшено более 5,8 млн тонн сырой нефти [16]. Активно ведутся работы по оценке параметров разлива нефти и нефтепродуктов и созданию ситуационных математических моделей нефтяного загрязнения для расчета средств борьбы (боновых заграждений и нефтесборщиков) [17-19]. Описаны прогнозные оценки по автоматизации системы управления производственными рисками [20]. Предлагаются методы организации очистки нефтесодержащих трюмных вод при эксплуатации судов внутреннего плавания [21]. Очистка становится чрезвычайно сложным процессом, поскольку распространение нефти по поверхности воды сопровождается множеством одновременных процессов, через которые она проходит, таких как: погружение, растекание, биодеградацию, испарение, всплытие, эмульгирование, диспергирование, образование смоляных шариков и фотоокисление [22]. Растущий спрос на нефтепродукты привёл к острой необходимости оперативного решения задач по восстановлению окружающей среды, поскольку имеются долгосрочные и тяжелые последствия естественного разрушения и высвобождения нерастворимых в воде соединений. Борьба с загрязнением, особенно воды, требует ряда мер, включая технологические разработки, вовлечение научного сообщества, законодательную базу и устойчивую этику, которые устанавливают строгие стандарты для управления деятельностью организаций, занимающихся транспортировкой и добычей нефти и нефтепродуктов. В связи с этим актуальными представляются исследования в области анализа нормативного обеспечения по организации и управлению природоохранной деятельностью для предотвращения загрязнений окружающей среды от разливов нефти и нефтепродуктов.

Целью данной статьи является анализ законодательной документации, касающейся организации и управления экологической деятельностью при предотвращении загрязнения окружающей среды от разливов нефти и нефтепродуктов.

**Методология.** В данной работе были использованы методы анализа нормативных документов и литературных источников для актуализации вопросов оценки и предотвращения загрязнения окружающей среды от разливов углеводородного сырья. При изучении нормативных документов и литературных источников использованы следующие критерии: процедура проведения оценки воздействия на окружающую среду, требования и процедуры для учета общественных предпочтений и минимизации негативных воздействий, порядок организации мероприятий и требования к составу сил и средств постоянной готовности, предназначенных для предупреждения и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов.

**Результаты.** Разливы углеводородного сырья могут оказывать значительное негативное влияние на экосистему. Интенсивность этого воздействия определяется несколькими основными факторами, указанными в таблице 1.

Все эти элементы взаимосвязаны, при взаимодействии объединяясь в полную картину влияния разливов углеводородного сырья на экосистему.

Основными критериями для оценки мер по предупреждению и ликвидации разливов нефти в морской среде являются:

– план предупреждения и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов;

– подготовленные и высоко квалифицированные силы ликвидации (АСС и АСФ), а также добровольцы;

– специализированное оборудование для локали-

зации распространения и ликвидации нефти, а также другое необходимое оборудование и суда;

– информационное обеспечение, включая данные об источнике разлива (объем, характеристики нефти) и условия в зоне инцидента (гидрометеорологические карты, карты уязвимости к нефти, логистические схемы);

– методическое обеспечение, представляющее рекомендации по действиям в различных ситуациях;

– финансовое обеспечение для реализации мероприятий, предусмотренных планом ликвидации разливов;

– система нормативных правовых актов, охватывающая законы, постановления и приказы (рис. 1).

*Таблица 1 – Ключевые факторы воздействия на окружающую среду от нефтяных разливов*

| Фактор воздействия | Влияние |
|---|---|
| 1. Количество и тип нефти или нефтепродукта | – Чем больше объем разлившейся нефти, тем серьезнее последствия.<br>– Тип нефти или продукта определяет его химический состав и токсичность, что влияет на реакцию живых организмов и экосистем. |
| 2. Экологическое состояние | – Географическое положение (морские воды, реки, озера, болота и т.д.) определяет, насколько быстро и далеко распространится разлив.<br>– Температура воздуха и воды влияет на скорость испарения и разложения нефтепродуктов. |
| 3. Чувствительность организмов и их местообитаний | – Некоторые виды организмов особенно уязвимы к нефтяным загрязнениям, например, морские млекопитающие и птицы.<br>– Места обитания с высокой биологической активностью (например, коралловые рифы) могут сильно пострадать даже от небольших разливов. |
| 4. Время | – Быстрое реагирование на разлив помогает минимизировать ущерб. |
| 5. Погодные условия | – Ветер и течения могут способствовать распространению нефти, усиливая её воздействие |
| 6. Другие факторы | – Уровень развития инфраструктуры и ресурсов для ликвидации разливов углеводородного сырья |




*Рисунок 1 – Схема системы нормативно-правовых актов, используемых при реализации плана ликвидации разливов нефтепродуктов в море*

**Обсуждение.** Статья 3 Федерального закона №7 "Об охране окружающей среды" описывает основные принципы, связанные с охраной окружающей среды. Наиболее важным среди них является защита права человека на здоровую и благоприятную окружающую среду. Этот принцип подразумевает, что государство должно предпринимать действия для предотвращения неблагоприятного воздействия на окружающую среду и создавать условия для поддержания экологического баланса [23].

В статье 32 Федерального закона №7 «Об охране окружающей среды» описывалась процедура проведения оценки воздействия на окружающую среду (ОС). Основные положения статьи сводятся к следующему:

– оценка воздействия на ОС представляет собой деятельность, направленную на выявление, анализ и учет последствий воздействия на окружающую среду планируемой хозяйственной и иной деятельности. Эта деятельность проводится независимо от организационно-правовых форм собственности юридических лиц и индивидуальных предпринимателей;

– целями оценки воздействия на ОС являются: устранение или уменьшение риска негативного воздействия на окружающую среду; мониторинг социальных, экономических и других последствий проведенной деятельности;

– в качестве результатов оценки воздействия на ОС выделяют: сведения о характере и масштабах воздействия на окружающую среду; учет общественных предпочтений при принятии решений;

– при разработке требований к материалам необходимо руководствоваться нормами, принятыми федеральными органами исполнительной власти, ответственными за охрану окружающей среды.

Кроме этого, в статье 32 №7-ФЗ (ред.2024 г.) процедура проведения оценки воздействия на окружающую среду отсутствует. Предъявляемые требования к материалам оценки воздействия на окружающую среду устанавливаются федеральными органами исполнительной власти, осуществляющими государственное управление в области охраны окружающей среды [24].

Федеральный закон №207-ФЗ вносит изменения в статью 46 Федерального закона «Об охране окружающей среды» в виде нового порядка учета отходов для организаций, которые занимаются добычей, перевозкой, хранением, производством и реализацией углеводородного сырья и продукции из него [25]. Данная статья регулирует процесс оценки последствий деятельности организаций на окружающую среду, устанавливает требования и процедуры для учета общественных предпочтений, а также для минимизации негативных последствий.

В соответствии с новыми нормами Федерального закона №7 "Об охране окружающей среды", организации, занимающиеся разведкой, добычей, хранением, а также транспортировкой углеводородного сырья и эксплуатацией опасных производственных объектов, должны заранее разрабатывать план по предотвращению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов. Этот план должен быть согласован с Росприроднадзором и включать меры по локализации и устранению таких разливов. Согласование плана происходит следующим образом:

1. План направляется в Росприроднадзор.

2. Росприроднадзор рассматривает план в течение 20 рабочих дней и либо согласовывает его, либо направляет замечания.

3. При получении замечаний, организация вносит необходимые доработки и повторно направляет план в Росприроднадзор. На этот раз рассмотрение занимает 10 рабочих дней.

4. При отсутствии в установленные сроки замечаний от Росприроднадзора, план считается согласованным.

Эксплуатирующими организациями требуется обеспечивать финансовые средства для осуществления мероприятий для реализации плана. В качестве финансового обеспечения организации могут использовать банковские гарантии, страховые договора и сформированные резервные фонды, а также гарантийные письма от федерального органа власти, органа власти субъекта Российской Федерации или местного самоуправления (для объектов, находящихся в государственной или муниципальной собственности). Объем финансового обеспечения предусматривается методикой, утвержденной уполномоченным федеральным органом власти.

Изменения, предусмотренные Законом №207-ФЗ [25], существенно увеличивают финансовые обязательства эксплуатирующих организаций в части предупреждения и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов. Эти изменения включают более строгие требования к разработке планов и созданию финансовых гарантий для покрытия возможных убытков.

В случае возникновения аварийной ситуации организация-эксплуатант обязана выполнить следующие действия:

1. Уведомить уполномоченные федеральные органы и местные власти о произошедшем разливе.

2. Привлечь свои аварийно-спасательные службы для начала ликвидации последствий разлива.

3. В случае необходимости сделать запрос в уполномоченные федеральные органы исполнительной власти для привлечения дополнительных сил и средств из системы РСЧС (Единая государственная система предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций) для устранения разлива нефтепродуктов.

После того как будут завершены мероприятия по ликвидации последствий разлива следует провести восстановительные работы, в рамках которых требуется полное возмещение причиненного вреда. Так как при самостоятельном устранении разлива возникают дополнительные временные затраты и увеличение ущерба, важно своевременно привлекать необходимые ресурсы и координировать действия всех заинтересованных сторон.

С 1 января 2021 года вступил в силу новый порядок организации мероприятий по предотвращению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов, который включает следующие правила:

1. «Требования к содержанию плана по предотвращению и ликвидации разливов». Организации, занимающиеся добычей, транспортировкой и переработкой нефти, обязаны разрабатывать планы, соответствующие установленным требованиям.

2. «Порядок проведения комплексных учений». Регулярно проводятся учения, направленные на проверку готовности организаций к действиям по локализации и ликвидации разливов.

3. «Выдача заключения о готовности». Эксплуатирующие организации получают официальное заключение о своей готовности к действиям по локализации и ликвидации разливов.

4. «Уведомление об утверждении плана». После утверждения плана необходимо уведомить соответствующие органы о его наличии и содержании.

Данный новый порядок ориентирован на увеличение эффективности мероприятий по предотвращению и устранению разливов нефти и нефтепродуктов, а также на улучшение взаимо-

действия между различными организациями и ведомствами, задействованными в этих процессах.

Процесс выявления, оценки и учета объектов накопленного вреда для окружающей среды регламентируется в статье 80.1 Федерального закона от 03.07.2016 N 254-ФЗ [26]. Основные положения данной статьи представлены в таблице 2.

Эти меры направлены на систематизацию информации о накопленных экологических проблемах и обеспечение контроля над их решением.

В статье 46 Федерального закона от 10 января 2002 года № 7-ФЗ (в ред. 2024) [24] "Об охране окружающей среды" и статье 55 Водного кодекса описаны требования к организациям, которые занимаются добычей, разведкой и транспортировкой нефти. Согласно данным статьям компании обязаны самостоятельно разрабатывать и реализовывать планы по предотвращению и устранению разливов нефтепродуктов. Эти планы должны учитывать все возможные сценарии аварий и предусматривать эффективные меры реагирования.

В случае если возникает чрезвычайная ситуация, то связанная с разливом организация, обязана предпринять следующие шаги:

1. Уведомление властей. Организация должна незамедлительно информировать соответствующие государственные органы о факте разлива нефти и нефтепродуктов.

2. Локализация и устранение разлива. Необходимо организовать работы по локализации и ликвидации разлива, используя как собственные ресурсы, так и привлекая специализированные компании.

3. Привлечение дополнительных ресурсов. В случае недостатка собственных сил, организация должна обратиться в соответствующие федеральные органы исполнительной власти для получения дополнительной помощи и средств.

4. Рекультивация территории. После устранения разлива следует провести рекультивационные работы для восстановления загрязненной территории до ее первоначального состояния.

5. Компенсация ущерба. Необходимо полностью возместить ущерб, причиненный окружающей среде, а также имуществу граждан и юридических лиц.

*Таблица 2 – Основные положения статьи 80.1 Федерального закона от 03.07.2016 N 254-ФЗ*

| № | Содержание | Пояснение |
|---|---|---|
| 1 | Обнаружение объектов накопленного вреда | Осуществление инвентаризации на территориях, где ранее осуществлялась производство. |
| 2 | Оценка объектов экологического ущерба | Определение объемов или масс загрязняющих веществ и отходов, а также их классификация по уровням опасности.<br>Мониторинг территорий и водных пространств, на которых зафиксирован накопленный экологический ущерб.<br>Классификация категорий и типов разрешенного землепользования.<br>Оценка отрицательного влияния на экосистему.<br>Выявление наличия опасных веществ на участках.<br>Определение числа людей, подверженных негативному воздействию экологии. |
| 3 | Идентификация и оценка объектов | Идентификацию и оценку объектов осуществляют органы государственной власти субъектов Российской Федерации или органы местного самоуправления.<br>В некоторых случаях эту функцию могут выполнять федеральные органы исполнительной власти. |
| 4 | Государственный реестр экологически опасных веществ | Реестр ведется уполномоченным федеральным административным органом.<br>Информация о таких объектах предоставляется по запросу в течение 30 рабочих дней. |
| 5 | Деятельность при ведении реестра | Рассмотрение материалов обнаружения и оценки объектов.<br>Решение о включении или отказе от включения в реестр.<br>Категоризация объектов.<br>Актуализация информации |
| 6 | Классификация объектов | Классификация проводится только для объектов, включенных в государственный реестр |
| 7 | Порядок ведения реестра | Порядок устанавливается Правительством Российской Федерации |
| 8 | Доступность информации | Основная информация из реестра доступна бесплатно.<br>Некоторые данные могут быть ограничены или относиться к государственной тайне |

Статья 55 Водного кодекса предписывает физическим и юридическим лицам соблюдать меры по охране водных объектов и использовать их рационально. Нарушения водного законодательства могут привести к административной или уголовной ответственности, а также требуют возмещения причиненного вреда.

Министерством транспорта Российской Федерации был утвержден приказ №523 от 27 октября 2020 года, согласно которому установлены требования к составу сил и средств постоянной готовности, предназначенных для предотвращения и устранения разливов нефти и нефтепродуктов на континентальном шельфе, в внутренних морских водах, в территориальном море и прилежащей зоне Российской Федерации [27]. Эти силы и средства используются и создаются в рамках функциональной подсистемы организации оперативных работ Единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций.

Силы и средства, предназначенные для предупреждения и ликвидации разливов нефти

и нефтепродуктов, должны соответствовать следующим требованиям:

– Оперативная готовность к действиям в любое время суток.

– Поддержание постоянной связи и возможность оперативной передачи информации.

– Постоянная готовность оборудования и персонала к началу операций.

– Мониторинг ситуации, включая прогнозирование распространения разлива.

– Возможность сбора разлитых нефти и нефтепродуктов.

– Умение осуществлять операции по локализации разливов.

– Обеспечение хранения и регулярного технического обслуживания специального оборудования.

Суда, входящие в состав сил, должны быть готовы выйти к месту разлива в течение одного часа после получения информации о происшествии.

В постановлении от 30.12.2020 № 2366 "Об организации предупреждения и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на континентальном шельфе Российской Федерации, во внутренних морских водах, в территориальном море и прилежащей зоне Российской Федерации" выделены следующие ключевые моменты [28]:

– Аварийно-спасательные мероприятия включают в себя ликвидацию разливов нефти и нефтепродуктов.

– Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации разрабатывает методику, по которой производится расчет финансовых средств, необходимых для мероприятий по предупреждению и ликвидации разливов, включая компенсацию причиненного ущерба.

Постановление № 2366 от 30.12.2020 актуализирует значимость адекватного финансирования для эффективного управления рисками и последствиями разливов нефти и нефтепродуктов, а также подчеркивает необходимость точного определения ресурсов, необходимых для возмещения потенциального ущерба.

**Выводы.** Проведенное исследование направлено на решение проблемы экологической безопасности, связанной с морскими перевозками углеводородного сырья. Проведен всесторонний анализ действующих нормативно-правовых документов по организации и управлению природоохранной деятельностью при предотвращении загрязнения окружающей среды от разливов нефти и нефтепродуктов. На основе результатов анализа выделена необходимость разработки компьютерной системы анализа и принятия решений для проведения операций по предупреждению и ликвидации разливов, включая требования к оборудованию и персоналу. Планируется разработка интегрированной информационно-аналитической системы, которая будет собирать данные о нефтяных разливах, анализировать их и предоставлять рекомендации по реагированию. Параллельно необходимо обеспечить регулярное обучение и повышение квалификации специалистов, работающих в области предупреждения и ликвидации нефтяных разливов. Необходимы расчеты экономических параметров для обеспечения достаточного финансирования для закупки необходимого оборудования и поддержания его в рабочем состоянии. Эти процессы должен сопровождать постоянный мониторинг работы системы с целью оценки ее эффективности и своевременного внесения необходимых корректив. Такой подход позволит не только повысить эффективность и надежность систем предупреждения и ликвидации аварийных ситуаций, но и обеспечит возможность оперативного реагирования в случае возникновения чрезвычайных ситуаций.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Molecular modeling and experimental confirmation of the search for agents mitigating toxic action of hydrogen sulfide / Li. Golovatskaya, Ev. Trizno, Yu. Smirnova, Mn. Trizno // Medicine of Extreme Situations. – 2023. – No. 2023(1). – DOI 10.47183/mes.2023.007. – EDN PPRLHY.

2. Цыгута, А.Н. Разработка базы данных по загрязняющим веществам с учетом эффективности противоядий / А.Н. Цыгута, Л.И. Головацкая, А.Е. Пластинин // Безопасность жизнедеятельности. – 2024. – № 7(283). – С. 34-41. – EDN FQXVXE.

3. Цыгута, А.Н. Изучение процессов образования моделей при взаимодействии молекул очистителя и загрязнителя на примере сероводорода и аспарагина / А.Н. Цыгута, Л.И. Головацкая // Каспийский научный журнал. – 2024. – № 1(2). – С. 66-75. – EDN QEMKKS.

4. Arctic Development in Connection with the Northern Sea Route: A Review of Ecological Risks and Ways to Avoid Them / I. Makarova, D. Makarov, P. Buyvol [et al.] // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10, No. 10. – P. 1415. – DOI 10.3390/jmse10101415. – EDN JRJADO.

5. Cheng, Q. Research status and evolution trends of emergency information resource management: Based on bibliometric analysis from 2003 to 2022 / Q. Cheng, Sh. Zhang // International Journal of Disaster Risk Reduction. – 2023. – Vol. 97. – P. 104053. – DOI 10.1016/j.ijdrr.2023.104053. – EDN MPFRPA.

6. Impact of the environmental pollution on cardiovascular diseases: From epidemiological to molecular evidence /Scimeca, Manuel et al.Heliyon, Volume 10, Issue 18, e38047.

7. Predicting the Underwater Movement of Diesel Fuel in the Event of a Ship Sinking / V. Naumov, A. Plastinin, A. Kalenkov, N. Rodina // International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia - 2021, Novosibirsk, 11–14 мая 2021 года. Vol. 402-1. – Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2022. – P. 1086-1094. – DOI 10.1007/978-3-030-96380-4_119. – EDN UDMEFK.

8. Risk frames and multiple ways of knowing: Coping with ambiguity in oil spill risk governance in the Norwegian Barents Sea / T. Parviainen, S. Kuikka, P. Haapasaari, A. Lehikoinen // Environmental Science & Policy. – 2019. – Vol. 98. – P. 95-111. – DOI 10.1016/j.envsci.2019.04.009. – EDN ONOQAJ.

9. Reshnyak, V.I. Environmental risks of accidental pollution during oil spills at water transport / V.I. Reshnyak, K.A. Kazmin // E3S Web of Conferences : 2018 International Science Conference on Business Technologies for Sustainable Urban Development, SPbWOSCE 2018, St. Petersburg, 10-12 декабря 2018 года. Vol. 110. – St. Petersburg: EDP Sciences, 2019. – P. 02084. – DOI 10.1051/e3sconf/201911002084. – EDN ZIIHRE.

10. Marine oil spill pollution causes and governance: A case study of Sanchi tanker collision and explosion / J. Chen, Z. Di, J. Shi [et al.] // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 273. – P. 122978. – DOI 10.1016/j.jclepro.2020.122978. – EDN GOGCWD., Impacts of Oil Spills on Arctic Marine Ecosystems: A Quantitative and Probabilistic Risk Assessment Perspective / I. Helle, J. Mäkinen, M. Nevalainen [et al.] // Environmental Science and Technology. – 2020. – Vol. 54, No. 4. – P. 2112-2121. – DOI

10.1021/acs.est.9b07086. – EDN JTEPDD.

11. The perceived risk of the Line 5 Pipeline and spills under ice / D. Bessette, R. Richardson, M. Rutty [et al.] // Journal of Great Lakes Research. – 2021. – Vol. 47, No. 1. – P. 226-235. – DOI 10.1016/j.jglr.2020.12.002. – EDN RLDBCT.

12. Анализ аварийности на морском транспорте с использованием метода байесовских сетей доверия / А.Н. Попов, Г.А. Зеленков, В.С. Плужник, О.Е. Бородин // Научные проблемы водного транспорта. – 2024. – № 79. – С. 250-258. – DOI 10.37890/jwt.vi79.485. – EDN DZWAEH.

13. Головацкая, Л. И. Оценка площади нефтяного загрязнения при разливах газового конденсата в Каспийском море / Л. И. Головацкая, А. Н. Бородин, А. Е. Пластинин // Морские интеллектуальные технологии. – 2023. – № 2-1(60). – С. 315-319. – DOI 10.37220/MIT.2023.60.2.039. – EDN MEQVPB,

14. Reshnyak, V. Evaluating environmental hazards of the potential sources of accidental spills / V. Reshnyak, O. Domnina, A. Plastinin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : 2021 International Symposium "Earth Sciences: History, Contemporary Issues and Prospects, ESHCIP 2021", Moscow, 10 марта 2021 года. Vol. 867. – IOP Publishing Ltd: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 012046. – DOI 10.1088/1755-1315/867/1/012046. – EDN QTOOYD.

15. Domnina, O. Assessment of the Risk of Transport Accidents, Considering the Environmental and Operational Components / O. Domnina, A. Plastinin, V. Reshnyak // International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia - 2021. Volume 2, Новосибирск, 11–14 мая 2021 года. – Новосибирск: Springer Nature, 2022. – P. 640-649. – DOI 10.1007/978-3-030-96383-5_71. – EDN WLFUIO.

16. Jake R. Nelson, Tony H. Grubesic, A spatiotemporal analysis of oil spill severity using a multi-criteria decision framework, Ocean & Coastal Management, Volume 199, 2021, 105410, ISSN 0964-5691, https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105410.

17. Каленков, А. Н. Прогнозирование разливов нефти с судов в Амурском бассейне / А. Н. Каленков, А. Е. Пластинин // Научные проблемы водного транспорта. – 2023. – № 74. – С. 216-228. – DOI 10.37890/jwt.vi74.341. – EDN YLZIGA.,

18. Hazard assessment and localization of oil spill fires at water bodies / В.С. Наумов, А.Е. Пластинин, Н.И. Волкова, А.Д. Шапошников // Морские интеллектуальные технологии. – 2022. – No. 2(56). – P. 269-278. – DOI 10.37220/mit.2022.56.2.035. – EDN UKDRVW.

19. Modelling oil trajectories and potentially contaminated areas from the Sanchi oil spill / F. Qiao, G. Wang, L. Yin [et al.] // Science of the Total Environment. – 2019. – Vol. 685. – P. 856-866. – DOI 10.1016/j.scitotenv.2019.06.255. – EDN CQVTZT.

20. Pautova, O. Predictive Assessment of the Technical and Economic Effect of the Implementation of Automated Production Risk Management Systems at the Shipyard / O. Pautova, E. Burmistrov // International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia - 2021. Volume 2, Новосибирск, 11–14 мая 2021 года. – Новосибирск: Springer Nature, 2022. – P. 879-887. – DOI 10.1007/978-3-030-96383-5_97. – EDN CNRNKZ.

21. Reshnyak, V. Organization of Purification of Oil Bilge Water in the Operation of Inland Navigation Vessels / V. Reshnyak, O. Domnina, A. Plastinin // International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia - 2021. Volume 2, Новосибирск, 11–14 мая 2021 года. – Новосибирск: Springer Nature, 2022. – P. 659-667. – DOI 10.1007/978-3-030-96383-5_73. – EDN UCBXXB.

22. Abdul Aziz Al-Majed, Abdulrauf Rasheed Adebayo, M. Enamul Hossain, A sustainable approach to controlling oil spills, Journal of Environmental Management, Volume 113, 2012, Pages 213-227, ISSN 0301-4797, https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.07.034.

23. Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» (в ред. Федерального закона от 04.08.2023 N 449-ФЗ) [Электронный ресурс] - Режим доступа: http://www.consultant.ru

24. Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» (ред. от 08.08.2024) [Электронный ресурс] - Режим доступа: http://www.consultant.ru.

25. Федеральный закон "О внесении изменений в статью 46 Федерального закона "Об охране окружающей среды" и отдельные законодательные акты Российской Федерации" от 13.07.2020 N 207-ФЗ (последняя редакция) [Электронный ресурс] - Режим доступа: http://www.consultant.ru.

26. Федеральный закон "О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации" от 03.07.2016 N 254-ФЗ (последняя редакция) [Электронный ресурс] - Режим доступа: http://www.consultant.ru.

27. Приказ Минтранса РФ от 27.11.2020 N 523 "Об утверждении требований к составу сил и средств постоянной готовности, предназначенных для предупреждения и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на континентальном шельфе Российской Федерации, во внутренних морских водах, в территориальном море и прилежащей зоне Российской Федерации" (Зарегистрировано в Минюсте РФ 31.12.2020 N 62015) [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://minjust.consultant.ru.

28. Постановление Правительства РФ от 30.12.2020 N 2366 (ред. от 14.12.2023) "Об организации предупреждения и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на континентальном шельфе Российской Федерации, во внутренних морских водах, в территориальном море и прилежащей зоне Российской Федерации" (вместе с "Правилами организации мероприятий по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на континентальном шельфе Российской Федерации, во внутренних морских водах, в территориальном море и прилежащей зоне Российской Федерации") [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.consultant.ru.

*Статья поступила в редакцию 05.10.2024*
*Статья принята к публикации 13.12.2024*

УДК 628.381.1
EDN: HNHFYW

# СПОСОБ ЛИКВИДАЦИИ АВАРИЙНЫХ РАЗЛИВОВ НЕФТИ НА ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ ОТХОДАМИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

© Автор(ы) 2024

ORCID: 0009-0007-2755-6753

**ХИСАМОВА Амина Шамилевна,** аспирант
*Казанский национальный исследовательский технологический университет*
*(420015, Россия, Казань, улица Карла Маркса, дом 68, e-mail: aminalatipova@mail.ru)*
SPIN: 9193-6493
AuthorID: 443183
ORCID: 0000-0003-4831-313X
ResearcherID: O-1232-2015
ScopusID: 7003993870

**СТЕПАНОВА Светлана Владимировна,** доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры «Инженерная экология»
*Казанский национальный исследовательский технологический университет*
*(420015, Россия, Казань, улица Карла Маркса, дом 68, e-mail: ssvkan@mail.ru)*
SPIN: 9098-1135
AuthorID: 768460
ORCID: 0000-0002-6119-1934
ResearcherID: ABB-3360-2020
ScopusID: 57191172442

**АЛЕКСЕЕВА Анна Александровна,** кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Инженерная экология»
*Казанский национальный исследовательский технологический университет*
*(420015, Россия, Казань, улица Карла Маркса, дом 68, e-mail: annan90@mail.ru)*

**Аннотация.** В работе представлены результаты исследования отходов сельского хозяйства в качестве сорбционного материала для ликвидации разливов нефти с поверхности воды. Показано, сорбционная способность по отношению к нефти зерновых оболочек плодов (шелухи) пшеницы составляет 5,25 г/г. Для улучшения сорбционных свойств шелуха пшеницы подвергалась модификации 1%-ным раствором серной кислоты в течении 60 минут. Установлено, что образцы модифицированной шелухи пшеницы поглощают на 20% больше нефти с поверхности воды, чем нативные: суммарная поглощающая способность для модифицированного образца составила 10,96 г/г, а для исходного – 4,26 г/г. Были рассчитаны оптимальные размеры сорбционных изделий для заданного объема разлившейся нефти. Для проверки полученных результатов изготовили миниатюры сорбирующих изделий, наполненных исходным и модифицированным исследуемым материалом, и произвели имитацию разлива нефти объемом 10 см³ на поверхности воды. В результате процесса сорбции остаточная концентрация нефти в воде составила 0,09 г/дм³ для исходного образца, 0,06 г/дм³ для модифицированного. Сорбционное изделие, наполненное модифицированной шелухой пшеницы, удаляет пленку нефти с поверхности воды на 99,31%, а исходной шелухой пшеницы на 98,96%. Использование модифицированной шелухи пшеницы для ликвидации нефтяных разливов оказалось более эффективно, чем исходного материала. Механический отжим показал, что выход нефти от использованных сорбционных изделий составляет 85,75% для модифицированного сорбента и 71,02% для исходного, что указывает на возможность повторного использования. Показано, что использование отходов сельского хозяйств, а именно шелухи пшеницы, в качестве сорбционного материала для ликвидации аварийных разливов нефти целесообразно и эффективно.

**Ключевые слова:** нефть, очистка воды, шелуха пшеницы, сорбционный материал, модификация, технологичность сорбента, разливы нефти.

# RESEARCH ON THE ELIMINATION OF OIL SPILLS ON THE SURFACE OF WATER USING WHEAT HULLS

© The Author(s) 2024

**KHISAMOVA Amina Shamilevna,** postgraduate student of the Department of «Engineering Ecology»
*Kazan National Research Technological University*
*(420015, Russia, Kazan, street Karl Marx, 68, e-mail: aminalatipova@mail.ru*
**STEPANOVA Svetlana Vladimirovna,** doctor of Technical Sciences,
professor of the department of «Engineering Ecology»
*Kazan National Research Technological University*
*(420015, Russia, Kazan, street Karl Marx, 68, e-mail: ssvkan@mail.ru)*

**ALEKSEEVA Anna Aleksandrovna**, candidate of technical Sciences,
associate Professor of the department of «Engineering Ecology»
*Kazan National Research Technological University*
*(420015, Russia, Kazan, street Karl Marx, 68, e-mail: annan90@mail.ru)*

**Abstract.** The paper presents the results of a study of agricultural waste as a sorption material for eliminating oil spills from the water surface. It is shown that the sorption capacity of grain husks of wheat fruits (husks) with respect to oil is 5.25 g/g. To improve the sorption properties, the wheat husk was modified with a 1% sulfuric acid solution for 60 minutes. It was found that the samples of modified wheat husk absorb 20% more oil from the water surface than the native ones: the total absorption capacity for the modified sample was 10.96 g/g, and for the original - 4.26 g/g. Based on the dynamics of oil spreading on the water surface, the optimal dimensions of the sorption product for a given volume of spilled oil were calculated. To verify the obtained results, miniatures of sorbent products filled with the original and modified study material were made, and an imitation of an oil spill of 10 $cm^3$ on the water surface was carried out. As a result of the sorption process, the residual concentration of oil in water was 0.09 g / $dm^3$ for the original sample, 0.06 g / $dm^3$ for the modified one. The sorption product filled with modified wheat husk removes the oil film from the water surface by 99.31%, and with the original wheat husk by 98.96%. The use of modified wheat husk for the elimination of oil spills turned out to be more effective than the original material. Mechanical squeezing showed that the oil yield from the used sorption products is 85.75% for the modified sorbent and 71.02% for the original, which indicates the possibility of reuse. It is shown that the use of agricultural waste, namely wheat husk, as a sorption material for the elimination of emergency oil spills is expedient and effective.

**Keywords:** oil, water purification, wheat husk, sorption material, modification, sorbent manufacturability.

*Для цитирования: Хисамова А.Ш. Способ ликвидации аварийных разливов нефти на поверхности воды отходами сельского хозяйства / А.Ш. Хисамова, С.В. Степанова, А.А. Алексеева // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 4(68). – С. 217-223. – EDN: HNHFYW.*

**Введение.** Сегодня нефть и её производные являются одними из наиболее востребованных ресурсов человечества. С интенсификацией промышленного производства и ростом численности населения пропорционально увеличиваются объёмы потребления нефти. Однако, добыча, переработка и использование нефти и её продуктов несут за собой негативные последствия для окружающей среды. Утечки, несанкционированные сбросы и аварии становятся причиной загрязнения водных экосистем и оказывают негативное воздействие на гидросферу и живые организмы, которые активно взаимодействуют в водной среде [1-3].

При разливе на водной поверхности нефть быстро распространяется, формируя пленки различной толщины. В условиях низких температур процесс распространения нефти значительно замедляется, тогда как в теплых и жарких климатических условиях площадь нефтяных пятен увеличивается. Воздействие солнечного излучения ускоряет окислительные процессы, особенно в областях с тонкими слоями нефти. В ходе распространения нефти и формирования эмульсий ее микрочастицы склонны к агрегации и могут адсорбироваться на других взвешенных частицах, что способствует их осаждению с тяжелыми фракциями. Легкие фракции нефти, как правило, остаются на поверхности воды или в ее поверхностных слоях [4-8].

Разливы нефти – очень опасное явление, поскольку затрагивается морская (речная) экосистема, а существование водных форм жизни подвергается излишней угрозе. Нефть содержит различные вещества, такие как тяжелые металлы и ароматические углеводороды, которые приводят к деградации воды и почвы взывают массовую гибель рыб, водных млекопитающих, птиц и других живых организмов приводя к смещению равновесия в экосистемах [9-11].

Поиск эффективных и доступных способов оперативной локализации и ликвидации нефтяных пятен является актуальной задачей. Сорбционный метод удаления нефти с водной поверхности и локализации нефтяных загрязнений является одним из наиболее применяемых, благодаря своей конструктивной простоте, высокой эффективности и доступности исходных материалов. Существует множество сорбентов, используемых для сбора нефти с поверхности воды, однако их применение связано с рядом ограничений, таких как высокая стоимость, сложность производства, низкая сорбционная способность и плавучесть, а также потенциальные негативные последствия для окружающей среды. [12-15]. В этой связи разработка сорбционных материалов, обладающих низкой себестоимостью, высокой сорбционной способностью, устойчивостью к оседанию с поверхности воды, возможностью многократного использования и простотой в эксплуатации, представляет собой актуальную задачу. Одним из перспективных видов сырья для таких материалов являются сельскохозяйственные продукты, в частности, отходы переработки зерновых культур.

В Республике Татарстан развито сельское хозяйство, в результате деятельности которого образуется большое количество целлюлозосодержащих отходов, таких как солома, шелуха, отруби, некачественное зерно, зерновая пыль и др.

Отходы зерновых культур находят применение в различных отраслях: в сельском хозяйстве их

используют как корм или добавки к корму для животных, а также для улучшения почвы в качестве мульчи; в пищевой промышленности – в качестве добавки к хлебобулочным изделиям; в химической промышленности – для производства целлюлозы, фурфурола, пентозанов и других целевых продуктов. Отходы зерновых культур находят применение в косметической, медицинской и других сферах [16, 17]. Тем не менее, такой вид отходов, как шелуха зачастую остается на производственных территориях, занимает значительные площади и способствует биологическому загрязнению окружающей среды. Ненадлежащее хранение или воздействие неблагоприятных погодных и антропогенных факторов при хранении больших объемов отходов на предприятиях могут привести к их инфицированию грибковыми и бактериальными патогенами, что негативно сказывается на экосистемах и создает риски заражения сельскохозяйственных культур и животных, что, в конечном счёте, снижает продовольственную безопасность. Несмотря на их низкую опасность (V класс – практически безопасные отходы), они представляют биологическую угрозу и угрозы возникновения пожароопасных ситуаций. Наличие в их составе целлюлозы и лигнина, которые формируют каркас клеточных стенок, обусловливает наличие микро- и макропористой структуры, что делает эти отходы перспективными для использования в качестве сорбентов для удаления нефти. Разработка сорбционных материалов на основе растительных отходов может решать несколько ключевых экологических проблем: утилизация органических отходов; снижение уровня загрязнения почв и водных ресурсов и повышение их качества за счёт поглощения вредных веществ, таких как тяжелые металлы и химические загрязнители.

**Методология.** Целью исследования являлось исследование возможности применения сорбционных материалов на основе шелухи пшеницы и ее модификата для ликвидации разливов нефти с поверхности воды.

В качестве сорбционного материла исследовалась шелуха пшеницы (ШП), которая легкодоступна и ежегодно образуется в Республике Татарстан в больших количествах в виде отхода. В качестве загрязнителя (сорбата) использовалась нефть девонового происхождения.

Для повышения сорбционных характеристик проводили модификацию ШП обработкой 1%-ным раствором серной кислоты. Отсортированные образцы ШП в течение 60 минут перемешивались на электрической качалке в растворе модификатора со скоростью 3000 об/мин, после чего сорбционный материал отфильтровывался и высушивался до постоянной массы.

У полученных сорбционных материалов – образцов исходной и модифицированной шелухи пшеницы (МШП), – определялись сорбционная емкость по отношению к воде (водопоглощение), нефти (нефтепоглощения), нефти с поверхности воды при различных концентрациях в течение 30 минут.

Исследование поглощающей способности ШП и МШП проводилось в статических условиях. Для определения остаточного содержания нефти в очищенной воде использовались гравиметрический и экстракционный методы [18].

В лабораторных условиях были эмитированы мероприятия по локализации и устранению нефтяных разливов с применением миниатюр боновых заграждений и матов, изготовленных из полимерной сетки с ячейками размером 2 × 2 мм, заполненных сорбентом на основе модифицированных шелухи и подсолнечника (МШП).

**Результаты.** Значения водопоглощения и нефтеемкости исходного и модифицированного сорбционного материала (СМ) представлены на рисунке 1.

Далее исследовалась эффективность применения СМ на основе ШП и МШП при ликвидации различного количества разлитой нефти на водной поверхности. Для имитации была использована девонская нефть объемом 0,5, 1, 3, 5, 10 см³, СМ массой 1 г и 50 см³ воды. Полученные результаты представлены на рисунке 2.

На рисунке 3 показано остаточное содержание нефти в воде после очистки водной поверхности.

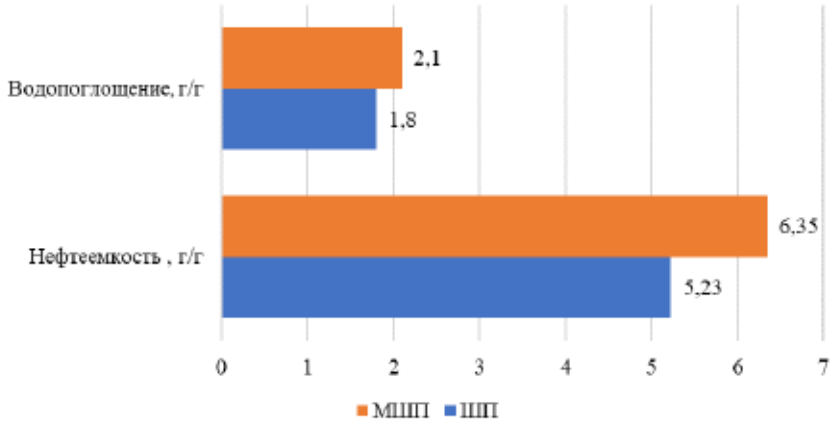



*Рисунок 1 – Водопоглощение и нефтеемкость сорбционных материалов на основе шелухи пшеницы*

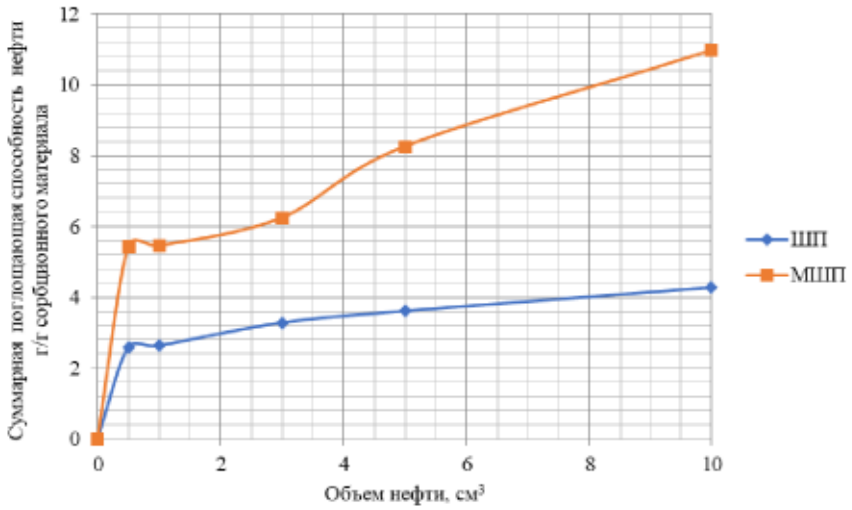



*Рисунок 2 – Зависимость суммарной поглощающей способности сорбционного материала (шелухи пшеницы и ее модификатов) от объема нефти*

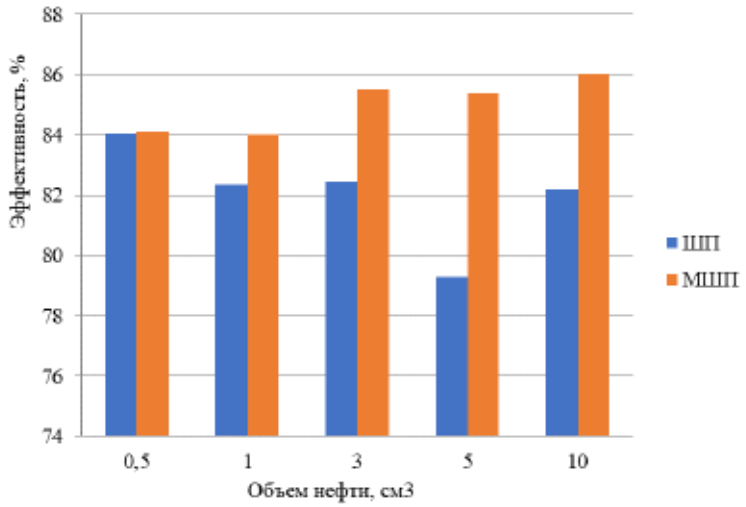



*Рисунок 3 – Эффективность поглощения нефти образцами ШП и МШП в зависимости от объема разлива нефти*

**Обсуждение.** Исходя из полученных экспериментальных данных, представленных на рисунке 1 видно, что образец МШП обладает увеличенной на 20% нефтеемкостью по сравнению с исходным образцом ШП. Данный факт обусловлен рядом причин: во-первых, гидролиз части целлюлозы под воздействием кислоты и вымывание компонентов растительных клеточных стенок (гемицеллюлозы и водорастворимых фракций лигнина); во-вторых, разволокнение структуры целлюлозы; в-третьих, удаление физических и механических примесей в результате вымывания при модификации.

При удалении нефтяной пленки с поверхности воды наибольшую эффективность очистки имеет МШП. С увеличением объема нефти суммарная поглощающая способность для МШП составляет 10,96 г/г, а для ШП – 4,26 г/г, что демонстрируется на рисунке 2

Наибольшая эффективность поглощения нефтяного пятна с поверхности воды отмечается у модифицированного образца СМ при объеме 10 см³ и составляет 86% (рис. 3), что указывает на потенциальную возможность использования МШП для ликвидации нефтяных разливов с водной поверхности.

Для разработки эффективной технологии использования сорбционного материала необходимо изучить процесс распространения нефтяного загрязнения по водной поверхности. Для этого исследовали поведение пленки нефти при их растекании на поверхности воды. На рисунке 4 представлен график, показывающий соотношение площади растекания нефти от времени и объема.

Полученные данные показывают, что при разливе нефти объем 10 см³ площадь нефтяной пленки на поверхности воды при статичной воде составила 23 см² через 30 секунд, и 50-100 см² через 60 секунд. Полученные данные позволили рассчитать толщину пленки нефти и сравнить полученные данные с экспериментальными. Толщина пленки после

60 секунд составила 0,1±0,05 см, исходя из этого для эффективной сорбции нефти выбрали высоту сорбирующего изделия 1,2 см.

Для выполнения лабораторных испытаний по ликвации нефтяного пятна необходимо изготовить сорбирующие изделия с наполнением из ШП и МШП. В качестве оболочки была выбрана полимерная сетка, устойчивая к разложению от нефти и ее производных с размером ячеек 2 × 2 мм. Для расчета массы СМ были взяты следующие критерии: эффективность, нефтеемкость и объем разлитой нефти.

Исходя из критериев количество СМ рассчитывалось по следующей формуле:

$$P_{пр\text{-}с} = Э_ч \cdot V_н / (100 \cdot A_{max})$$

где $Э_ч$ – эффективность, т.е. процент сорбируемой нефти,%;

$V_н$ – объем разлива нефти, см³;

$A_{max}$ – сорбционная способность СМ, кг/кг.

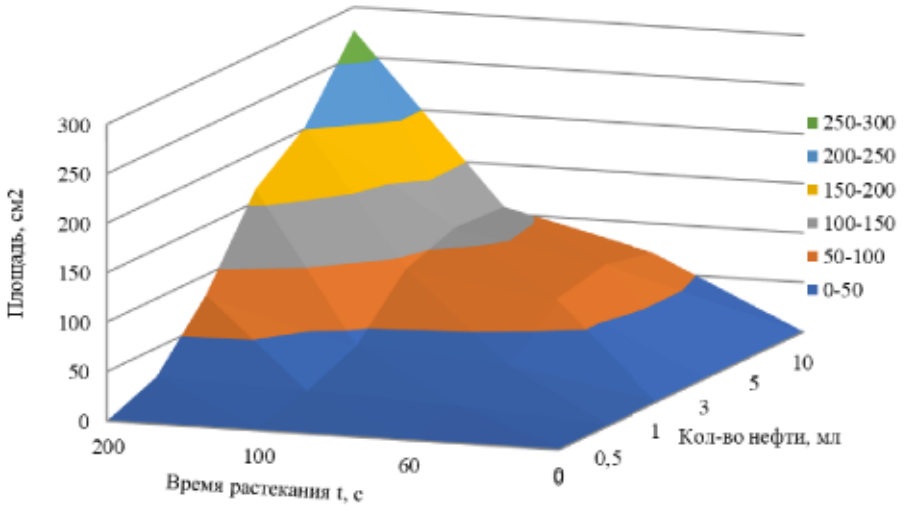



*Рисунок 4 – Зависимость количества разлившейся нефти от времени растекания и площади образующегося пятна*

Зная количество СМ, с учетом его насыпной плотности [19], рассчитали геометрические размеры сорбционных изделий.

Поскольку имитация разлива нефти была проведена в круглом резервуаре, для повышения эффективности локализации нефтяной плёнки было решено использовать маты близкой к треугольной форме. Это обусловлено тем, что треугольная форма мата позволяет более эффективно охватывать площадь поверхности воды, обеспечивая лучшее прилегание к стенкам резервуара и минимизируя возможность утечек нефти за пределы зоны воздействия. Кроме того, такая геометрия способствует оптимальному распределению сорбционного материала, что может улучшить его взаимодействие с нефтяным загрязнением.

Объем сорбционного изделия вычислили по следующей формуле:

$$V_{изделия} = \frac{P_{пр.с.}}{\rho_{насып.}}$$

где $V_{изделия}$ – объем изделия, м³;

$P_{пр.с.}$ – количество СМ, кг;

$\rho_{насып.}$ – насыпная плотность СМ, кг/ м³;

Для определения сторон матов треугольной формы использовали формулу Герона, с помощью которой получили данные и сконструировали сорбционное изделие (мат) (рис. 5).

На следующем этапе был осуществлён процесс масштабирования разлива нефти на поверхности воды и имитация локализации, и ликвидация нефтяного пятна с использованием сорбционных изделий, наполненных ШП и МШП. В ёмкости с 2 дм³ воды был смоделирован разлив путём добавления 10 см³ нефти, которая заняла площадь 706 см². По истечению 30 секунд нефтяное пятно локализировали миниатюрами сорбирующих бонов. Длина каждого сорбирующего бона составляла 7 см, диаметр 2 см, боны соединили последовательно, оградив пятно от дальнейшего растекания. После локализации на нефтяное пятно помещали миниатюры сорбирующих матов, размеры которых приближены к расчетным. После 30 минут контактирования сорбирующих изделий с нефтяным пятном они были удалены с поверхности воды. В очищенной от нефтяного пятна воде было измерено остаточное содержание нефти, которое составило 0,06 г/л при использовании изделий наполненных МШП и 0,09 г/л – исходной ШП. Визуально процесс представлен на рисунке 6

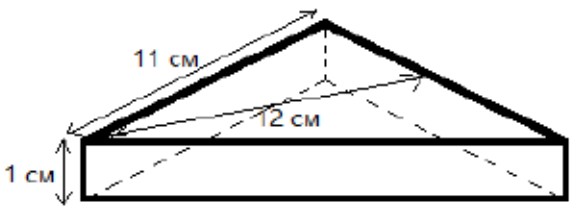



*Рисунок 5 – Размеры сорбирующего изделия*

Изготовленные маты и боны из СМ и насыщенные нефтью представлены на рисунке 7.

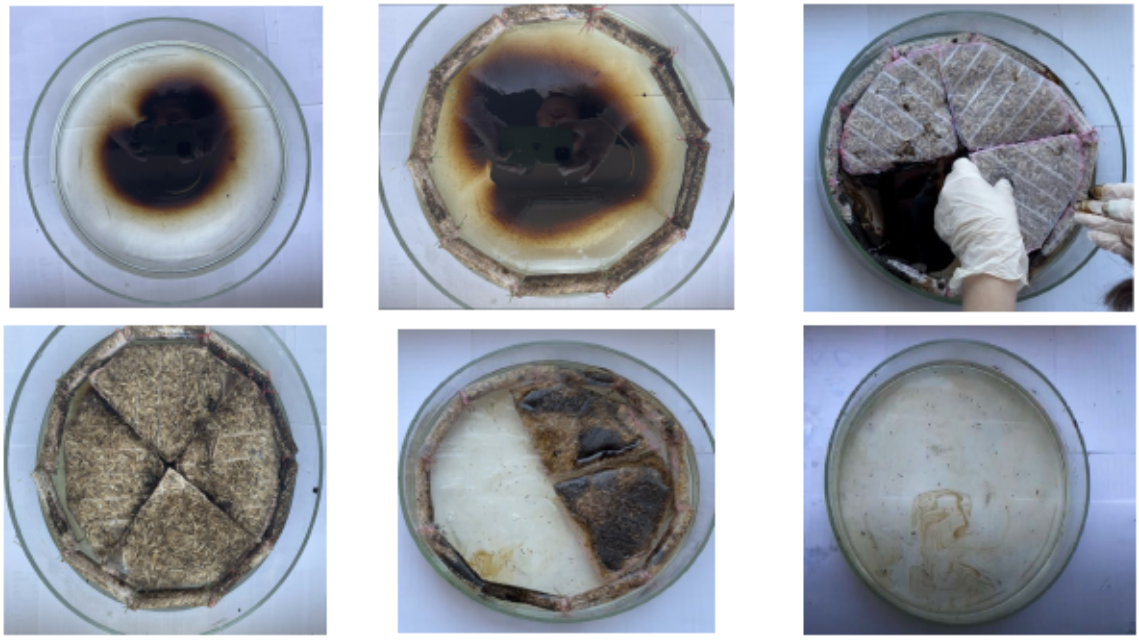


*Рисунок 6 – Визуализация проведения этапов локализации и ликвидации разлива нефти с поверхности воды*



*а)* *б)*

*Рисунок 7 – Маты и боны из СМ: а) до сбора нефти; б) после сбора нефти с поверхности воды*

Полученные результаты указывают, что сорбционное изделие, изготовленное из модифицированного материала, демонстрирует более высокую эффективность в удалении нефтяной плёнки с поверхности воды, составившую 99,31%, по сравнению с немодифицированным материалом, эффективность которого составила 98,96%. Это свидетельствует о том, что модификация материала, улучшает его адгезионные и сорбционные свойства, позволяя ему более эффективно захватывать и удерживать нефтяные компоненты. Такие данные будут полезны для разработки более эффективных технологий и материалов для очистки водоёмов от нефтяных загрязнений.

Эффективность использования СМ для ликвидации нефтеразливов определяется не только его сорбционной способностью, но и удобством, простотой в применении, возможностью возврата поглощённой нефти в производственный цикл, а также безопасной утилизацией использованного сорбента. В ходе экспериментов была оценена степень десорбции, что является важным показателем для оценки повторного использования сорбционных материалов [20]. Результаты регенерации отработанного сорбента методом механического отжима показали выход нефти в размере 85,75% для модифицированного сорбента на основе МШП и 71,02% для сорбента на основе ШП. Это позволяет утверждать, что исследуемые материалы могут быть использованы в течение как минимум двух циклов.

**Выводы.** Проведенные исследования показывают, что модифицированный сорбционный материал отвечает современным требованиям к технологичным сорбционнымматериалам,обеспечиваяэффективность удаления нефтяных загрязнений с поверхности воды на уровне 99%. Показано, что сорбционный материал работает эффективно не только в форме рассыпного сорбента, но и в форме сорбционных изделий,

которые были рассчитаны, изготовлены и апробированы. Эффективность использования сорбционных изделий составила 99,31% – с наполнением из МШП, 98,96% – с наполнением из ШП. Причины повышенной эффективности сорбционных изделий перед рассыпными сорбентами следующие:

– увеличение площади контакта – формированные сорбенты позволяют увеличить эффективную площадь контакта, благодаря многослойности. Такая пористая структура позволяет увеличить доступную площадь для взаимодействия нефти с сорбционным материалом, что напрямую способствует росту скорости и объема захвата загрязнителей;

– контроле и локализации нефтяного пятна – изделия не только позволяют эффективнее сорбировать нефти, но и контролируют расширение зоны загрязнения.

Помимо того сорбционные изделия сохраняют свою форму и остаются на поверхности воды, что облегчает их последующую утилизацию. Рассыпные сорбенты могут частично утонуть, теряя свою эффективность, или разноситься ветром и течением.

Данный факт демонстрирует возможность применения МШП в различных водных экосистемах, а также для разработки новых технологий, направленных на минимизацию негативного воздействия нефтяных разливов на окружающую среду.

Для построения полного технологического цикла по производству сорбционных изделий и эффективной ликвидации разливов нефти на поверхности водоёмов необходимо разработать технологическую схему, которая учтет все этапы — от производства материала до его утилизации. Внедрение таких технологий может стать основой для мероприятий по экологической безопасности, включая создание систем мониторинга водных ресурсов, программы по восстановлению экосистем, а также меры по снижению антропогенной нагрузки на окружающую среду.

Кроме того, результаты данной работы могут быть использованы для разработки стандартов и рекомендаций по применению сорбционных технологий в условиях реальных нефтяных разливов, а также для подготовки специалистов в области экологии и нефтяной промышленности, что будет способствовать повышению общей экологической устойчивости и улучшению состояния водных экосистем.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Акимова А.С., Филиппова Л.С. Последствия загрязнения поверхностных и сточных вод нефтью и нефтепродуктами // Международный научно-исследовательский журнал. – 2022. – №. 11 (125). – С. 84. DOI: 10.23670/IRJ.2022.125.102.

2. Akpoghelie J.O., Ugbuku U.A., Esemedafe U.J. A review of oil spill pollution and air quality in the niger delta: Causes, effects and control // Journal of Chemical Society of Nigeria. – 2021. – Т. 46. – №. 5. – С. 125-129. DOI: https://doi.org/10.46602/jcsn.v46i5.660.

3. Huang Y. et al. Water pollution incidents and their influencing factors in China during the past 20 years // Environmental monitoring and assessment. – 2022. – Т. 194. – №. 3. – С. 182.

4. Дашкина Д.Р., Поволоцкая А.Е. Исследование применения для ликвидации разливов нефти на почве сорбционных материалов на основе плодовых оболочек зерен ячменя // Молодежь и системная модернизация страны. – 2022. – С. 256-258.

5. Нефть и экология континентального шельфа. 2-е изд. переработанное и дополненное Морской нефтегазовый комплекс: состояние, перспективы, факторы воздействия: в 2 т.; / С.А. Патин – М.: ВНИРО, 2017. – Т 1. – 345 с.

6. Пережогин Д.Ю. Разработка алгоритма прогнозирования аварийных разливов нефти в гис-системе методами математического моделирования // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2019. – №. 1. – С. 6-12. DOI: 10.17122/ogbus-2019-1-6-12.

7. Li C. et al. Spreading characteristics of emulsified oils with different water contents on water // Ocean Engineering. – 2024. – Т. 310. – С. 118504.

8. Asif Z. et al. Environmental impacts and challenges associated with oil spills on shorelines // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – Т. 10. – №. 6. – С. 762.

9. Kuppusamy S. et al. Ecological impacts of total petroleum hydrocarbons // Total Petroleum Hydrocarbons: Environmental Fate, Toxicity, and Remediation. – 2020. – С. 95-138.

10. Loyeh E.N., Mohsenpour R. Investigation of oil pollution on aquatic animals and methods of its prevention // J Aquac Mar Biol. – 2020. – Т. 9. – №. 5. – С. 160-165.

11. Hook S.E. Beyond thresholds: A holistic approach to impact assessment is needed to enable accurate predictions of environmental risk from oil spills // Integrated Environmental Assessment and Management. – 2020. – Т. 16. – №. 6. – С. 813-830.

12. Wahi R. et al. Oil removal from aqueous state by natural fibrous sorbent: An overview // Purif. Technol. – 2013. – № 113. – P. 51-63. DOI:10.1016/j.seppur.2013.04.015.

13. Чанг Ч.И.Д., Зенитова Л.А. Исследование сорбционной способности сорбента для ликвидации нефтеразливов на основе пенополиуретана и хитина // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. – 2019. – №. 2. – С. 33-47. DOI: 10.15593/2224-9400/2019.2.03.

14. Алексеева А.А., Степанова СВ. Повышение технологичности сорбционных изделий на основе листового опада для применения с целью локализации и ликвидации нефтеразливов на водной поверхности // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2023. – Т. 13. – № 3. – С. 261-271.

15. Kumar P. et al. Status of adsorptive removal of dye from textile industry effluent // Desalination and Water Treatment. 2012. Т. 50. №. 1-3. С. 226-244. DOI:10.1080/19443994.2012.719472.

16. Hassan S.A. et al. Utilization of cereal-based husks to achieve sustainable development goals: Treatment of wastewater, biofuels, and biodegradable packaging // Trends in Food Science & Technology. – 2023. – С. 104166.

17. Skendi A. et al. Advances on the valorisation and functionalization of by-products and wastes from cereal-based processing industry // Foods. – 2020. – Т. 9. – №. 9. – С. 1243.

18. Stepanova S.V., Alekseeva A.A., Khafiova L.Y., Technological recommendations for the use of leaf litter based adsorption material to remove an oil slick from water bodies surface // IV International Scientific and Technical Conference «Energy Systems» IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. 791 (2020) С. 012076. DOI:10.1088/1757-899X/791/1/012076.

19. РД 153-39.4Р-125-02. Табель оснащения нефтепроводных предприятий ОАО «АК "Транснефть» техническими средствами для ликвидации аварийных разливов нефти на подводных переходах магистральных нефтепроводов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293836/4293836517.htm (дата обращения 05.09.2024)

20. Казарезов А.А., Ларичкина Н.И., Ларичкин В.В. Исследование возможности многократного использования абсорбционного мата для ликвидации разливов нефтепродуктов на почву // Наука. Промышленность. Оборона: тр. 24 Всерос. науч.-техн. конф., Новосибирск, 19-21 апр. 2023 г: в 4 т. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2023. – Т. 3. – С. 156-160.

*Статья поступила в редакцию 23.09.2024*
*Статья принята к публикации 13.12.2024*

УДК 331.45
EDN: DDRBDW

# ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК КАК ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА

©Автор(ы) 2024
SPIN: 4944-2360
AuthorID: 1035858
ORCID: 0000-0001-6840-6865

**НАМ Галина Евгеньевна,** старший преподаватель кафедры «Техносферная безопасность»
*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет*
*(190005, Россия, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, e-mail: yamibum@gmail.com)*

**Аннотация.** В данной статье проведен анализ применения цифрового двойника в различных отраслях, в том числе и в обеспечении безопасности труда на строительной площадке. Развитие цифровых технологий дает возможность совершенствовать существующую систему управления охраной труда. Цифровой двойник рассматривается как необходимое звено в создании современной цифровой системы контроля безопасности труда, отвечающей новым требованиям в вопросах цифровизации строительной отрасли. Цифровой двойник направлен на реализацию предупредительных мероприятий с целью контроля уровня безопасности и снижения травматизма на строительной площадке. Описаны основные требования, предъявляемые к цифровому двойнику в рамках безопасности труда. Подробно рассмотрены уровни детализации цифрового двойника для каждого критерия оценки уровня безопасности труда. Также, определены границы двойника, необходимые для функционирования цифровой системы контроля безопасности труда. Обязательным требованием является наличие обратной связи между всеми участниками, задействованными на строительной площадке, наличие синхронизации данных в реальном времени между виртуальным и физическим объектами для возможности реагировать на опережение при любых отклонениях от нормативных требований безопасности труда. Сформулировано определение цифрового двойника для безопасности труда.

**Ключевые слова:** цифровой двойник, цифровизация, безопасность труда, система контроля, уровень детализации, строительная площадка, травматизм, позиционирование, режим реального времени, превентивные мероприятия.

# DIGITAL TWIN AS A TOOL FOR IMPLEMENTING A DIGITAL OCCUPATIONAL SAFETY CONTROL SYSTEM

© The Author 2024
**NAM Galina Evgenievna,** senior teacher of the department «Technosphere Safety»
*Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering*
*(190005, Russia, Saint Petersburg, Vtoraya Krasnoarmeiskaya street 4, e-mail: yamibum@gmail.com)*

**Abstract.** This article analyzes the application of a digital twin in various industries, including occupational safety on construction sites. The development of digital technologies makes it possible to improve existing occupational safety management system. A digital twin is a necessary element in creating a modern digital occupational safety control system that meets new requirements in the digitalization of the construction industry. The digital twin is aimed at implementing preventive measures to control the level of safety and reduce injuries at the construction site. The main requirements for the digital twin are described in the context of labor safety. A mandatory requirement is the presence of feedback between all members involved in the in the construction process, also the presence of real-time data synchronization between virtual and physical objects to be able to proactively respond to any deviations from regulatory labor safety requirements. A definition of a digital twin for occupational safety has been formulated. A definition of a digital twin for labor safety has been formulated.

**Keywords**: digital twin, digitalization, occupational safety, control system, level of detail, construction site, injuries, positioning, real-time mode, preventive measures.

*Для цитирования: Нам Г.Е. Цифровой двойник как инструмент для реализации цифровой системы контроля безопасности труда / Г.Е. Нам // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 4(68). – С. 224-229. – EDN: DDRBDW.*

**Введение.** Сегодня цифровые двойники (далее – ЦД) активно внедряются в строительную отрасль, решая присущие ей проблемы, такие как сложное управление проектами, сроки реализации проекта, контроль качества, вопросы безопасности и воздействие на окружающую среду.

Концепция ЦД привлекла значительное внимание компаний, которые, в свою очередь, попытались и дальше продвигать эту идею в различных отраслях. Хотя каждая компания может иметь свое собственное определение ЦД, эти определения в целом совпадают с оригинальной формулировкой М. Гривза.

Термин «цифровой двойник» или «*digital twin*»

был впервые введен Майклом Гривзом в Мичиганском университете в 2000-х годах. Гривз описал «цифровой двойник» как «цифровое представление физического продукта, состоящее из трех элементов: физического продукта в реальном пространстве, виртуального продукта в виртуальном пространстве и двунаправленных данных и информационных соединений, которые их связывают» [1].

Например, Siemens определяет цифрового двойника как «виртуальную модель физического объекта или системы, которая может использоваться для моделирования поведения этого объекта или системы, чтобы лучше понять, как они работают в реальной жизни» [2]. Аналогично, IBM определяет цифрового двойника как «виртуальное представление объекта или системы, которое охватывает весь его жизненный цикл, обновляется на основе данных в реальном времени и использует моделирование, машинное обучение и рассуждения для помощи в принятии решений» [3].

В России определение ЦД утверждено на законодательном уровне в ГОСТ Р 57700.37-2021, который устанавливает определение и общие положения создания и применения цифровых двойников изделий в промышленности. «ЦД – это система, состоящая из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием (при наличии изделия) и (или) его составными частями» [4].

**Методология.** Целью данной статьи является обоснование применения ЦД, формулировка определения и требований к свойствам ЦД в контексте безопасности труда в строительной отрасли.

Концепция ЦД сегодня применяется в различных секторах: от розничной торговли до здравоохранения, горнодобывающей промышленности, сельского хозяйства, автомобилестроения, образования, аэрокосмической отрасли и строительства. Здесь определения ЦД различаются в зависимости от функций и целей, которым они служат в конкретных отраслях или контекстах.

В компьютерных технологиях ЦД воспринимается как сетевое моделирование и абстрактное представление состояния физического оборудования [5]. В секторе автоматизации они служат основным связующим звеном между сетевыми моделями и физическими механическими устройствами, способствуя улучшению и оптимизации производительности системы. [6].

В архитектурном проектировании ЦД определяется как создание визуальных и цифровых моделей физических объектов. [7]. Эта технология обеспечивает обмен данными в реальном времени между физическим и цифровым объектами, способствуя глубокому взаимодействию между ними. Она поддерживает такие операции, как мониторинг в реальном времени, обновление данных, моделирование процессов, анализ, контроль, прогнозирование и оптимизация. Кроме того, она обеспечивает эффективное взаимодействие между подразделениями на протяжении всего жизненного цикла объекта строительства.

В строительной отрасли на реализацию проекта необходимо большое количество ресурсов и времени. Строительство любого объекта характеризуется сложной динамической средой и технологическими процессами. Эта стадия не только требует постоянного надзора за качеством и ходом строительства, но и обеспечения безопасности. Одновременно необходима координация между всеми участниками строительства, для гарантии своевременного выполнения работ в соответствии с установленным планом. Применение ЦД в строительстве в первую очередь включает в себя строительный мониторинг, планирование, безопасность строительства и координацию.

Также, цифровые двойники могут быть использованы для удаленного мониторинга и управления производством, оценки качества, обнаружения дефектов, контроля безопасности, оптимизации процессов, проектирования, предиктивного обслуживания, повышения производительности, снижения затрат, предиктивной аналитики, визуализации данных, образования и учебных целей [8-11].

Однако, несмотря на эти многочисленные преимущества, зарубежное применение цифровых двойников в области безопасности труда все еще находится на ранних стадиях. В отечественной научной практике применение ЦД на сегодняшний день практически не рассматривалось. Существуют единичные разработки, которые находятся на начальном этапе или имеют узкую направленность [12].

В целях снижения количества несчастных случаев во время строительства автором была предложена система информационной поддержки принятия решений, которая описана более подробно в статье

Развитие методики в основном зависит от двух аспектов:

– средств мониторинга и контроля для получения информации о безопасности в режиме реального времени;

– требований, предъявляемых к ЦД.

В этом контексте непрерывный мониторинг и аналитика данных являются незаменимыми. Такие меры способствуют раннему выявлению нарушений требований безопасности труда, позволяя быстро принимать корректирующие меры для предотвращения несчастного случая. Тем не менее, в настоящее время нет мнения относительно набора требований к ЦД. Поэтому автором статьи сформулированы основные требования с точки зрения его применения в области безопасности труда на строительной площадке.

**Результаты.** В результате исследования описаны следующие требования к ЦД в рамках безопасности труда:

– границы (выделенные зоны/ участки);

– детализация;

– синхронизация в зависимости от дискретности

передачи данных с видеокамер и др. устройств контроля (наблюдения) на основе их технических характеристик, для отображения актуальной и информативной модели, которая позволяет отследить процессы в реальном времени;

– обратная связь для контроля изменений с учетом замечаний (настраиваемая локальная сеть, *WiFi*, сотовая связь, радиосвязь и т.д.) предаваемая информация на устройства (планшеты, смартфоны, трекеры, рации и др.).

Рассмотри первые два пункта более подробно.

*Границы.* ЦД занимает большой объем данных, поэтому, за границы ЦД принимается вся строительная площадка (рис.1), но, важно отметить, что нет необходимости использовать высокий уровень детализации для всей территории площадки. Например, разобьем строительную площадку на две зоны. Тем самым, будет целесообразно использовать высокий уровень детализации для зоны 1 и низкий уровень детализации для зоны 2. Зона 1 представляет собой само строящееся здание или сооружение, зона 2 – территория вокруг строящегося здания или сооружения в пределах границ строительной площадки (рис. 2).

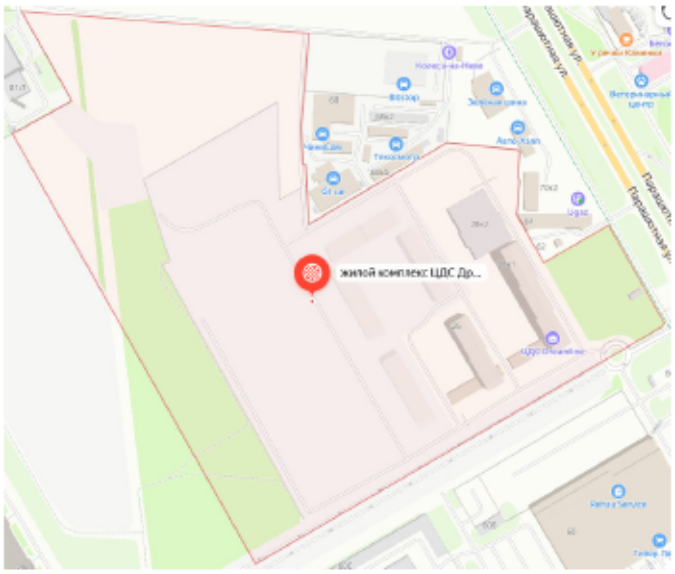



*Рисунок 1 – Границы строительной площадки*




*Рисунок 2 – Деление строительной площадки на зоны*

*Детализация.* Определение необходимого, но достаточного уровня детализации – один из решающих факторов при разработке цифрового двойника. Высокий уровень детализации может стать причиной медленной работы инструмента и неверных выводов, основанных на неточном прогнозе. Низкий уровень может способствовать «пропуску информации» и стать причиной нереализуемых или ошибочных решений.

Так как ЦД создается на базе цифровой информационной модели, то целесообразно применять существующие уровни проработки (далее –

*LOD*) Это «набор требований, определяющий полноту проработки элемента цифровой информационной модели. Уровень проработки задает минимальный объем геометрических, пространственных, количественных, а также любых атрибутивных данных, необходимых для решения задач информационного моделирования на конкретной стадии жизненного цикла объекта» [13].

На данный момент существует пять уровней проработки. В СП 333.1325800.2020 более подробно сформулировано описание и применение каждого из них.

Также важно понимать, что определённый LOD описывает уровень проработки не для всей информационной модели здания, а только для отдельных её элементов. Для каждой категории должно быть описание, насколько проработана геометрия и какие параметры необходимы. Допускается введение промежуточных уровней детализации для специфических требований в реализации элементов.

Далее сформулируем требования к уровням проработки ЦД для критериев, описанных в статье Г.Е. Нам, О.В. Горбуновой «Критерии контроля уровня безопасности труда для организации цифровой системы мониторинга на строительной площадке».

*Таблица 1 – Требования к детализации ЦД в контексте безопасности труда на строительной площадке*

| Критерий | Контролируемые факторы | Уровень детализации | Необходимые функции |
|---|---|---|---|
| «Персонал» | Информация (квалификация, инструктажи, обучение, мед. заключение и проч.) | LOD 100 | Элемент ЦД представлен с указанием приблизительных данных о количестве, размерах, форме, пространственном положении и ориентации. Сопровождается неграфической информацией [13]. |
| | Средства индивидуальной защиты | LOD 300 | Элементы ЦД с определенными величинами, размерами, формами, положением и ориентацией. Сопровождается неграфической информацией [13]. |
| | Позиционирование | LOD 400 | Элементы ЦД с графическим представлением системы или объекта с определенными величинами, размерами, формами, пространственным положением, ориентацией. Сопровождается неграфической информацией [13]. |
| «Машины и оборудование» | Документация (ЧТО, ПТО, проектная и проч.) | LOD 100 | Элемент ЦД представлен с указанием приблизительных данных о количестве, размерах, форме, пространственном положении и ориентации. Сопровождается неграфической информацией [13]. |
| | Условия эксплуатации | LOD 300 | Элементы ЦД с определенными величинами, размерами, формами, положением и ориентацией. Сопровождается неграфической информацией [13]. |
| | Позиционирование | LOD 400 | Элементы ЦД с графическим представлением системы или объекта с определенными величинами, размерами, формами, пространственным положением, ориентацией. Сопровождается неграфической информацией [13]. |
| «Фактическое состояние рабочего места» | Эргономика | LOD 400 | Элементы ЦД с графическим представлением системы или объекта с определенными величинами, размерами, формами, пространственным положением, ориентацией. Сопровождается неграфической информацией [13]. |
| | Вредные производственные факторы | LOD 250 | Промежуточный уровень универсального графического представления с приблизительным количеством, размером, формой, положением и ориентацией и, в случае необходимости, основной неграфическая информацией [13]. |
| | Климатические условия | Уровень детализации не требуется | Данные с интерактивных метеорологических карт |
| «Фактическое состояние строительной площадки» | Объемно-планировочные работы | LOD 300 | Элементы ЦД с определенными величинами, размерами, формами, положением и ориентацией. Сопровождается неграфической информацией [13]. |
| | Пожарная безопасность | LOD 300 | |
| | Промышленная безопасность | LOD 300 | |
| «Средства защиты» | Идет связь с критерием «Персонал» | LOD 300 | Элементы ЦД с определенными величинами, размерами, формами, положением и ориентацией. Сопровождается неграфической информацией [13]. |
| | Документация | LOD 100 | Элемент ЦД представлен с указанием приблизительных данных о количестве, размерах, форме, пространственном положении и ориентации. Сопровождается неграфической информацией [13]. |
| «Опасные виды работ» | Документация | LOD 100 | Элемент ЦД представлен с указанием приблизительных данных о количестве, размерах, форме, пространственном положении и ориентации. Сопровождается неграфической информацией [13]. |
| | Организация рабочего места | LOD 400 | Элементы ЦД с графическим представлением системы или объекта с определенными величинами, размерами, формами, пространственным положением, ориентацией. Сопровождается неграфической информацией [13]. |

Поясним подробнее на примере критерия «Персонал» (рис. 3).

Основные отслеживаемые факторы критерия «Персонал» включают в себя:

– документацию;

– позиционирование работников;

– ношение СИЗ.

Фактор «Документация» не требует глубокой проработки детализации, достаточно иметь неграфическую информацию о каждом работнике (пройденные инструктажи, обучение, квалификация, стаж, мед. осмотры и проч.). Высокой степенью детализации должны обладать «Позиционирование» и «СИЗ», т.к. важно знать местонахождение работников и какими СИЗ обеспечен работник, носит ли он их и соответствуют ли они Единым типовым нормам выдачи СИЗ. Далее каждый фактор оценивается по шкале состояния в режиме реального времени. В результате такой оценки создаются мероприятия превентивного характера для предотвращения негативного развития событий в случае выявления нарушений требований безопасности.

Определение необходимого уровня детализации дает возможность более точно оценить состояние как каждого фактора по отдельности, так и всего критерия в целом.

Рассмотрим необходимость проработки детализации на примере позиционирования. Попадание человека в опасную зону работы экскаватора должен иметь следующие три условия: местоположение экскаватора, местоположение человека и радиус действия экскаватора. В соответствии с п. 139 Приказа Минтруда России от 11.12.2020 N 883н «Об утверждении Правил по охране труда при строительстве, реконструкции и ремонте» при работе экскаватора не разрешается производить другие работы со стороны забоя и находиться работникам на расстоянии ближе 5 м от радиуса действия экскаватора [14]. Поэтому при построении модели двойника попадания человека в опасную зону работы экскаватора следует установить значение радиус действия экскаватора больше, чем в действительности. Тем самым модель двойника может реагировать, когда значение расстояния человека до опасной зоны достигает установленного порога, что обеспечивает достаточное время реагирования до возникновения аварии.

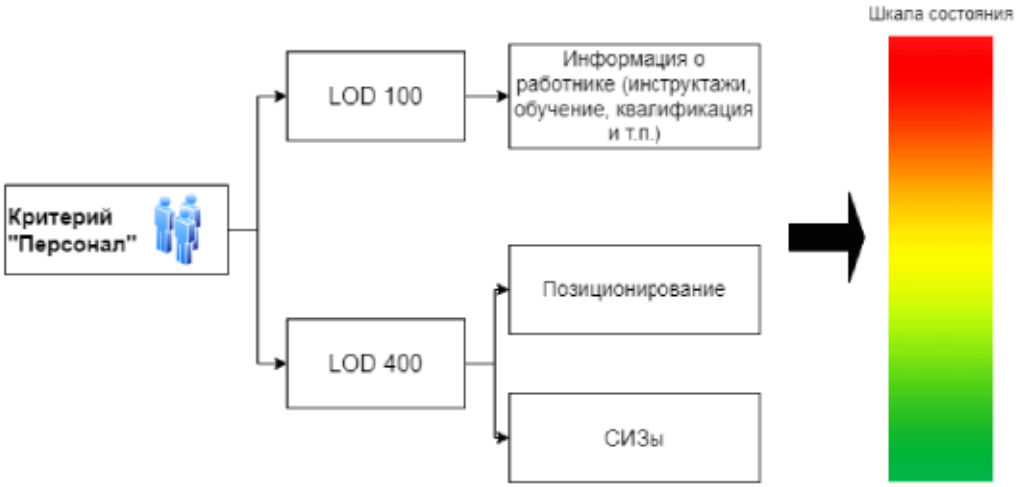



*Рисунок 3 – Оценка состояния факторов критерия «Персонал» с применением детализации*

**Обсуждение.** На основе ЦД могут быть реализованы процессы, такие как мониторинг, прогнозирование, оптимизация, управление и т.д. [15].

Более широкое применение ЦД подразумевает взаимодействие различных технологий, например, виртуализации, Интернета-вещей, искусственного интеллекта и, в значительной степени, опирается на огромный объем данных, поступающих из физического мира, или на информацию, предоставленную, например, экспертами в предметной области или другими участниками строительного процесса, для точного воспроизведения поведения физического двойника [16, 17]. Если модель ЦД не соответствует физическим требованиям, то необходима дальнейшая проработка модели для обеспечения точности с ее физическим двойником.

Требования, указанные выше, являются базовыми. Конечно, в зависимости от объекта строительства, его уникальности, объемов и назначения, данный список требований может быть расширен, присвоенные уровни детализации могут быть изменены, а границы – расширены/уменьшены. Конкретная модель ЦД ориентирована на фактические потребности или требования определенных объектов.

Кроме того, внедрение ЦД является как трудоемким, так и дорогостоящим процессом, поскольку происходит обмен данными в реальном времени и их передача от физического объекта в ЦД объекта, что требует значительных ресурсов. Во многих исследованиях изучалось применение ЦД в различных отраслях без учета экономических аспектов [18].

**Выводы.** Описаны требования к ЦД в области

безопасности труда, где прописаны необходимые уровни детализации для каждого критерия оценки безопасности труда, обозначены необходимые границы строительной площадки, наличие обратной связи и синхронизации данных в реальном времени между виртуальным и физическим объектами для возможности опережающего реагирования на любые отклонения от нормативных требований безопасности труда.

Основываясь на результатах проведенного исследования, дадим определение цифрового двойника в области безопасности труда на строительной площадке. Цифровой двойник – это виртуальная модель физического объекта/системы/элемента с двунаправленной передачей данных в режиме реального времени для контроля за уровнем безопасности и реализацией предупредительных мероприятий с целью снижения уровня травматизма на физическом объекте.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Grieves, M. Digital Twin, Manufacturing Excellence Through Virtual Factory Replication / M. Grieves // White Pap: электронный журнал. – URL: https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_through_Virtual_Factory_Replication. – Дата публикации: 2014 (дата обращения 03.09.24).

2. Deloitte, Siemens and the model-based enterprise: The future of the digital twin - thought leadership // Siemens: сайт. – URL: https://blogs.sw.siemens.com/thought-leadership/2023/04/05/deloitte-siemens-and-the-model-based-enterprise-the-future-of-the-digital-twin/ (дата обращения: 09.09.2024).

3. What is a digital twin? // IBM: сайт. – URL: https://www.ibm.com/topics/what-is-a-digital-twin (дата обращения: 09.09.2024).

4. ГОСТ Р 57700.37-2021 Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения: дата введения 01.01.2022. – Москва: ФГБУ "РСТ", 2021. – 16 с.

5. Lu, Y. Cloud-based manufacturing equipment and big data analytics to enable on-demand manufacturing service / Y. Lu, X. Xu // Rob Comput Integr Manuf. – 2019. – № 57. – С. 92-102.

6. Leng, J., et al. ManuChain: Combining permissioned blockchain with a holistic optimization model as bi-level intelligence for smart manufacturing / J. Leng // IEEE Trans Syst, Man, Cybern: Syst. – 2019. – Т. 50, № 1. – С. 182-192.

7. Kaur, M.J. The convergence of digital twin, IoT, and machine learning: transforming data into action / M.J. Kaur, V.P. Mishra, P. Maheshwari // Digital Twin Technologies and Smart Cities. – 2020. – С. 3-17.

8. Attaran, M. Digital twin: Benefits, use cases, challenges, and opportunities / M. Attaran, B.G. Celik // Decision Analytics Journal. – 2023. – Т. 6.

9. What is digital twin technology? And what are the benefits? // Autodesk: сайт. – URL: https://www.autodesk.com/solutions/digital-twin (дата обращения: 09.09.2024).

10. Gulewicz, M. Digital twin technology — awareness, implementation problems and benefits / M. Gulewicz // Engineering Management in Production and Services. – 2022. – Т. 14. – С. 63-77.

11. What is digital twin technology? And what are the benefits? // Autodesk: сайт. – URL: https://www.autodesk.com/solutions/digital-twin (дата обращения: 09.09.2024).

12. Шарманов В.В., Симанкина Т.Л., Горбачев И.А. Идентификация местоположения работника на объекте строительства с помощью цифрового двойника // Вестник Научного центра. 2022. №3. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/identifikatsiya-mestopolozheniya-rabotnika-na-obekte-stroitelstva-s-pomoschyu-tsifrovogo-dvoynika (дата обращения: 09.09.2024).

13. СП 333.1325800.2020 «Информационное моделирование в строительстве. Правила формирования информационной модели объектов на различных стадиях жизненного цикла»: дата введения 2021-07-01. – Москва: Стандартинформ, 2020. – 226 с.

14. Приказа Минтруда России от 11.12.2020 N 883н «Об утверждении правил по охране труда при строительстве, реконструкции и ремонте».

15. Tao, F. Digital twin modeling / F. Tao, B. Xiao, Q. Qi // Journal of Manufacturing Systems. – 2022. – Т. 64. – С. 372-389.

16. Singh, M. Digital twin: Origin to future / M. Singh, E. Fuenmayor, E.P. Hinchy // Appl. Syst. Innov. – 2021. – Т. 4, № 2.

17. Farahani, B. The convergence of IoT and distributed ledger technologies (DLT): Opportunities, challenges, and solutions / B. Farahani, F. Firouzi, M. Luecking // Journal of Network and Computer Applications. – 2021. – Т. 177.

18. Feng, H. Application of digital twin technologies in construction: an overview of opportunities and challenges / H. Feng, Q. Chen, B.G. de Soto // Civil Engineering. – 2021. – Т. 2021-November. – С. 979-986.

*Статья поступила в редакцию 11.09.2024*
*Статья принята к публикации 13.12.2024*

***Статья публикуется по результатам проведения научно-исследовательской работы, проводимой в рамках конкурса грантов на выполнение научно-исследовательских работ научно-педагогическими работниками СПбГАСУ в 2024 году.***

УДК 331.4, 624.9, 004.942
EDN: WNYXEU

# ОЦЕНКА СФОРМИРОВАННОСТИ МОДЕЛИ БЕЗОПАСНОГО ПОВЕДЕНИЯ РАБОТНИКА ЧЕРЕЗ ОБОБЩЕННУЮ ФУНКЦИЮ ЖЕЛАТЕЛЬНОСТИ ХАРРИНГТОНА

©Автор(ы) 2024

SPIN: 2070-8620
AuthorID: 958394
ORCID: 0000-0002-0557-6725
ScopusID: 57983646500

**СУББОТИНА Надежда Андреевна**, старший преподаватель кафедры «Техносферная безопасность
*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет*
*(190005, Россия, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, e-mail: subbota_91@mail.ru)*

SPIN: 4586-8078
AuthorID: 609617
ORCID: 0000-0002-6878-0512
ScopusID: 56149908500

**НИКУЛИН Андрей Николаевич,** доцент кафедры «Техносферная безопасность»
*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет*
*(190005, Россия, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, e-mail: nikulin-rus@yandex.ru)*

SPIN: 1565-6291
AuthorID: 812147
ORCID: 0000-0003-3014-2969

**ГОНЧАРУК Татьяна Николаевна,** старший преподаватель кафедры «Техносферная безопасность»
*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет*
*(190005, Россия, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, e-mail: tatjana.goncharuk@yandex.ru)*

**Аннотация**. Данная статья посвящена внедрению инновационных подходов к обучению в области охраны труда. Статистика показывает, что в строительной отрасли неизменно выявляется самое большое количество смертельных несчастных случаев, причиной которым являются недостатки в организации работ и множество нарушений в области обучения. В рамках реализации инновационного образовательного проекта «Современные образовательные технологии для обеспечения безопасности труда в строительной отрасли» авторы разработали методику обучения, в основе которой лежит использование инновационного учебного комплекса «Полигон «Умный труд». Одним из важнейших компонентов методики является оценка входных данных обучающихся (начальный уровень сформированности модели безопасного поведения) и оценка сформированности теоретических знаний и практических навыков модели безопасного поведения на выходе. Предлагается оценивать данные параметры при помощи обобщенной функции желательности Харрингтона. Методика оценки сформированности модели безопасного поведения работника сформулирована на основе обобщенной функции желательности Харрингтона с авторской интерпретацией результатов исследований.

**Ключевые слова:** методика обучения, модель безопасного поведения, охрана труда, обучение, проверка знаний, обобщенная функция желательности Харрингтона, теоретические знания, практические навыки, безопасность, культура безопасности.

# ASSESSMENT OF THE FORMATION OF A MODEL OF SAFE BEHAVIOR OF WORKERS THROUGH THE GENERALIZED HARRINGTON DESIRABILITY FUNCTION

© The Author(s) 2024

**SUBBOTINA Nadezhda Andreevna**, senior lecturer of the department «Technosphere safety»
*Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering*
*(190005, Russia, Saint Petersburg, Vtoraya Krasnoarmeiskaya street 4, e-mail: subbota_91@mail.ru)*

**NIKULIN Andrey Nikolaevich,** associate professor of the department «Technosphere safety»
*Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering*
*(190005, Russia, Saint Petersburg, Vtoraya Krasnoarmeiskaya street 4, e-mail: nikulin-rus@yandex.ru)*

**GONCHARUK Tatiana Nikolaevna,** senior lecturer of the department «Technosphere safety»
*Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering*
*(190005, Russia, Saint Petersburg, Vtoraya Krasnoarmeiskaya street 4, e-mail: tatjana.goncharuk@yandex.ru)*

**Abstract.** This article is devoted to the implementation of innovative approaches to training in the field of labor protection. Statistics show that the construction industry consistently reveals the largest number of fatal accidents caused by deficiencies in the organization of work and many violations in the field of training. As part of the implementation of the innovative educational project «Modern educational technologies for ensuring labor safety in the construction industry», the authors have developed a teaching methodology based on the use of the innovative educational complex «Polygon «Smart Labor». One of the most important components of the methodology is the assessment of the input data

of students (the initial level of formation of the safe behavior model) and the assessment of the formation of theoretical knowledge and practical skills of the safe behavior model at the output. It is proposed to evaluate these parameters using the generalized Harrington desirability function. The methodology for assessing the formation of the worker's safe behavior model is formulated on the basis of the generalized Harrington desirability function with the author's interpretation of the research results.

**Keywords:** teaching methodology, model of safe behavior, labor protection, training, knowledge testing, generalized Harrington desirability function, theoretical knowledge, practical skills, safety, safety culture.

*Для цитирования: Субботина Н.А. Оценка сформированности модели безопасного поведения работника через обобщенную функцию желательности Харрингтона / Н.А. Субботина, А.Н. Никулин, Т.Н. Гончарук // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 4(68). – С. 230-237. – EDN: WNYXEU.*

**Введение.** Строительная отрасль Российской Федерации является лидером по количество смертельных несчастных случаев среди всех отраслей промышленности. Каждый пятый работник (в среднем около 370 человек в год) получает несовместимые с жизнью травмы при выполнении рабочих операций. За период с 2018 по 2023 общее количество несчастных случаев в строительной сфере России неуклонно растет и превышает 2700 случаев, среди которых более 1000 с тяжелыми последствиями. Основной причиной травматизма на производстве является падение с высоты (23%), что преимущественно свойственно строительной отрасли (43%). В основе причин производственного травматизма (67,7%) является плохая организация производства работ и «человеческий фактор», что обуславливает низкий уровень культуры безопасного труда, несоблюдением и игнорированием самых элементарных норм и правил. По результатам проверок строительных площадок государственной инспекцией труда города Санкт-Петербурга около 10% выявленных нарушений связаны с отсутствием обязательного обучения у работников требованиям охраны труда. Статистика основных видов несчастных случаев, а также их причин и результаты проверок ГИТ взяты из Результатов общероссийского мониторинга условий и охраны труда за 2018-2023 годы [1].

В Санкт-Петербургском государственном архитектурно-строительном университета (СПбГАСУ) в октябре 2021 года состоялось открытие инновационного учебного комплекса «Полигон «Умный труд», который стал базой отработки современных подходов к организации обучения требованиям охраны труда для работников строительной отрасли [2].

В 2022 году СПбГАСУ получил статус Федеральной инновационной площадки и приступил к реализации инновационного образовательного проекта «Современные образовательные технологии для обеспечения безопасности труда в строительной отрасли» [3, 4]. В 2023 году проект приобрел статус Проекта развития СПбГАСУ на период с 2023 по 2032 годы.

Результатом реализации вышеуказанных проектов стала методика обучения с использованием современных образовательных технологий для обеспечения безопасности труда в строительной отрасли (далее - Методика).

Разработанный в рамках написания Методики алгоритм процесса обучения требованиям охраны труда представляет собой инструкцию выполнения последовательных действий, направленных на получение знаний и навыков в области охраны труда и представлен на рисунке 1.

Рассмотрим чуть подробнее каждый из этапов алгоритма:

1 этап – входное тестирование. Входное тестирование первого этапа определяет уровень подготовленности обучающихся (уровень исходных данных) на момент начала занятий, позволяет оценить сформированность модели безопасного поведения через обобщенный коэффициент желательности *D*, и выбрать правильную обучающую стратегию.

2 этап – погружение в обучающую среду «Полигон «Умный труд». Важный этап в обучении – восприятие исходного материала. Организация подачи материала посредством наглядности и инсценировки последствий аварийных ситуаций делает его увлекательным и во многом обеспечивает понимание и осмысление.

3 этап – обучение на *VR* тренажере. Инновационным подходом к обучению по охране труда является также внедрение технологий виртуальной реальности в процесс обучения.

4 этап – практические занятия по формированию умений и навыков. Закрепление обучающимися теоретического материала и выработка умений и навыков самостоятельной профессиональной деятельности происходит посредством выполнения практических задач.

5 этап – проверка знания требований охраны труда. Неотъемлемой частью обучения требованиям охраны труда является проверка знания, которая определяет качество усвоенных и приобретенных знаний, умений и навыков, а изменение обобщенного коэффициента желательности *D* по отношению к значению, полученному на первом этапе, покажет произошли ли изменения в формировании модели безопасного поведения.

Методика разработана в соответствии с требованиями нормативно-правовых актов, содержащих государственные нормативные требования охраны труда и направлена на формирование (совершенствование) модели безопасного поведения у обучающихся – системы теоретических знаний и практических и навыков при помощи интерактивных

методов обучения.

Проведение оценки результативности и эффективности деятельности в области охраны труда является важнейшей процедурой по реализации современных подходов к регулированию в области охраны труда, в рамках которых постсобытийные «модели штрафных санкций» (выявление уже совершенного нарушения и наказание за несоблюдение правил и требований) постепенно должны смениться упреждающими «моделями профилактического соответствия» (внедрение мероприятий профилактики и предупреждения нарушений и происшествий). Изучив различные методики по оценке эффективности и результативности различных мероприятий и процедур в области охраны труда [5-14], авторами сделан вывод о возможности оценки сформированности модели безопасного поведения через обобщенную функцию желательности Харрингтона. В свою очередь значение обобщенного коэффициента желательности связано с вероятностью возникновения различных по тяжести несчастных случаев на производстве, что подтверждается в работах [15, 16] и подчеркивает важность определения данного показателя. Также, вычисление данного показателя позволит оценить эффективность обучения и внести необходимые коррективы в систему обучения в области охраны труда.




*Рисунок 1 – Алгоритм процесса обучения с использованием современных образовательных технологий для обеспечения безопасности труда в строительной отрасли*

**Методология.** Входные и выходные показатели обучающегося играют важную роль в прогнозировании его дальнейшего поведения на рабочем месте и соблюдения требований охраны труда. Целью данной статьи является разработка методического подхода к оценке сформированности модели безопасного поведения через обобщенную функцию желательности Харрингтона. Обобщенный коэффициент желательности (*D*), вычисленный на основании результатов входного тестирования, покажет начальный уровень сформированности теоретических знаний в модели безопасного поведения, а результаты проверки знаний требований охраны труда на последнем этапе покажут итоговое значение коэффициентов желательности сформированности теоретических знаний и практических навыков в модели безопасного поведения. Входное и выходное тестирование на проверку теоретических знаний проводится при помощи компьютера, результаты тестирования сводятся в таблицу *Excel*, где и происходит дальнейший расчет обобщенного коэффициента желательности *D* по методике, приведенной ниже. Проверка усвоения практических навыков производится экзаменатором при помощи заранее описанного инструктором пошагового выполнения практических заданий с видеофиксацией выполнения поставленных задач. На основе результатов прохождения практического экзамена рассчитывается обобщенный коэффициент желательности сформированности практических навыков в модели безопасного поведения при помощи *Excel*.

**Результаты.** Модель безопасного поведения (МБП) – это сформированная у каждого человека система теоретических знаний и практических навыков.

Формирование и совершенствование МБП работника направлено на достижение следующей цели – предотвращения связанных с работой случаев травматизма и заболеваемости.

Оценка сформированности МБП работника является многокритериальной задачей, для решения которой могут применяться различные методы построения итогового показателя. Одним из таких методов выступает обобщенная функция желательности Харрингтона, которая позволяет получить числовой и лингвистический показатели сформированности МБП работника [17, 18]. Для дальнейшей оценки сформированности МБП за основу взята методика, предложенная ГОСТ 12.0.230.3-2016 [19].

Методика оценки сформированности МБП работника сформулирована на основе обобщенной функции желательности Харрингтона с авторской интерпретацией результатов исследований.

Порядок расчета обобщенного коэффициента желательности (*D*) на первом этапе алгоритма обучения (рис. 1) состоит из следующих шагов:

1. Определение показателей сформированности МБП работника (*I*) экспертным путем (вопросы входного тестирования на знание требований охраны труда).
2. Сопоставление фактических *I* работника после прохождения тестирования с эталонными (правильные ответы на вопросы, из нормативных документов).
3. Определение весового коэффициента для каждого *I* – *w* от 1 до 2 экспертным путем.
4. Расчет *D* с определением лингвистической и цифровой оценок.
5. Составление программы обучения и набора практических и теоретических занятий для совершенствования МБП.

На 1 этапе требуется определить конкретные *I* для различных должностей работников (составить тестирование на основе правил по охране труда и других нормативных требований к обеспечению безопасности различных видов работ), с учетом специфики производственной деятельности. Стоит отметить, что *I* могут быть любого характера, так как выразить их значение можно как в числах, в долях, так и в процентах.

Количество *I* должно соответствовать выполнению государственных нормативных актов по охране труда и корпоративным стандартам предприятия, а также должно определяться экспертным путем и согласовываться с руководством. Выполнение этапов 2 и 3 осуществляется путем тестирования работников и внесением в таблицу *Excel* фактических значений показателей, на основе результатов тестирования. Этап 4 выполняет *Excel* с предоставлением пользователю полученных результатов. На 5 этапе, на основе полученных данных на 4 этапе, принимается план мероприятий по совершенствованию МБП работника.

Приведем пример расчета обобщенного коэффициента желательности (*D*), полученного на основании тестирования работника, выполняющего работы на высоте. Сформированность МБП оценивалась по 35 вопросам из банка вопросов для данного вида работ. Результаты прохождения тестирования были занесены в таблицу *Excel*, дальнейшие вычисления происходят в ней.

В начале расчета фактические показатели оцениваются на факт формального выполнения, по принципу «да – нет». При этом верный ответ на вопрос имеет оценку «да», а неверный даже частично будет иметь оценку «нет». Для этого используется единичный показатель $E_n$, который учитывает количество положительных и отрицательных показателей, где «+1» – «да», «-1» – «нет» и равен:

$$E_{\text{п}} = \frac{(n^+ - n^-)}{(n^+ + n^-)} \quad (1)$$

где $n^+$ – количество положительных ответов, $n^-$ – количество отрицательных ответов.

На практике единичный показатель чаще всего приводят к относительной форме в долях от базовой (реперной, нормативной) величины на интервале от 0 до 1,0. Поэтому далее ответ по каждому показателю (вопросу из тестирования) переводится в доли, где 0 означает полностью неверный ответ, 1,0 – абсолютно верный, а, например, 0,66 – что ответ на 2/3 верен (возможно при множественном выборе в ответе на вопрос). Данный шаг выполняется для реализации дальнейших расчетов обобщенных функций.

Помимо единичных показателей существуют обобщенные (комплексные, сложные, интегральные, синтезированные и т.п.) показатели, получаемые теми или иными методами из единичных показателей с помощью различных функций. Такие показатели определяют (рассчитывают) путем построения сводной сравнительной оценки, которая, объединяя информацию о значениях отдельных единичных показателей и информацию об их значимости, позволила бы упорядочить (проранжировать) по степени их общей предпочтительности все рассматриваемые объекты.

Наиболее часто в практике методов обобщенных показателей применяется аддитивная синтезирующая функция – взвешенная арифметическая средняя $Q_A$, где каждый суммируемый отдельный *i*-ый единичный показатель $q_i$ берется с тем или иным весом значимости $w_i$:

$$Q_{\text{A}} = \frac{\sum_1 w_i q_i}{W} \quad (2)$$

где $W = \sum w_i$.

Следует отметить, что $Q_A$ не позволяет описать критичность состояния всей модели безопасного поведения при невыполнении отдельного показателя. Это является недостатком, который следует устранить

расчетом мультипликативной синтезирующей функции – взвешенной геометрической средней $Q_Г$, где каждый перемножаемый отдельный $i$-ый единичный показатель $q_i$ берется с тем или иным весом значимости $w_i$ (возводится в степень значимости):

$$Q_Г = (\prod_i q_i^{w_i})^{1/W} \quad (3)$$

В функции $Q_Г$ «слабый» показатель одного элемента влечет «слабый» показатель всей системы.

На рисунке 2 представлена вырезка из таблицы *Excel* (пример заполнения показателей в зависимости от ответов тестируемого работника), на основании которой ведется дальнейший расчет.

На основе нормативных и фактических показателей при применении приведенных формул производится расчет $E_n$ = –0,538; $Q_A$ = 0,211; $Q_Г$ = 0,430.

При отрицательном значении $E_n$ следует произвести его интерполяцию в область положительных значений и получим значение $E_n$ = 0,231 (рис. 3) [20].

Оценка сформированности модели безопасного поведения осуществляется на основе обобщенной функции желательности Харрингтона:

$$d = exp[-exp(-Y)] \quad (4)$$

Ось $Y$ обозначает шкалу частных показателей от минус 2 до 3. Ось $d$ – шкалу желательности каждого $i$-го показателя, которая делится на 5 диапазонов от 0 до 1.

Соответствие между отношениями предпочтения в числовых и лингвистических системах представлены в таблице 1.

| Раздел знаний требований безопасности | № п.п. | Показатель | Требуемое значение | Фактическое значение | Оценка -1 или +1 | Оценка от 0 до 1 qi | Взвешивающий коэффициент от 1 до 2 wi | | qi*wi | qi^wi |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Требования к работникам при работе на высоте | 1 | С какого возраста можно допустить работника к выполнению работ на высоте? | 18 лет | 21 | -1,0 | 0,00 | 1,5 | | 0,00 | 0,00 |
| | 2 | Сколько существует групп по безопасности работ на высоте?<br>а) одна<br>б) две<br>в) три<br>г) четыре | в | б | -1,0 | 0,00 | 1 | | 0,00 | 0,00 |
| | 3 | Кто относится к 1-й группе по безопасности работ на высоте? Отметьте правильные ответы.<br>а) работники, допускаемые к работам в составе бригады<br>б) работники, допускаемые к работам под непосредственным контролем работника, назначенного приказом работодателя<br>в) бригадиры, мастера<br>г) руководители стажировки<br>д) ответственные исполнители (производители) работ на высоте<br>е)работники, назначаемые работодателем ответственными за организацию и безопасное проведение работ на высоте<br>ж) ответственные за составление плана мероприятий по эвакуации и спасению | а, б | а, б, в | -1,0 | 0,66 | 1,5 | | 0,99 | 0,54 |
| | 4 | Кто относится ко 2-й группе по безопасности работ на высоте? Отметьте правильные ответы.<br>а) работники, допускаемые к работам в составе бригады<br>б) работники, допускаемые к работам под непосредственным контролем работника, назначенного приказом работодателя<br>в) бригадиры, мастера<br>г) руководители стажировки<br>д) ответственные исполнители (производители) работ на высоте | в, г, д | в,г,д | 1,0 | 1,00 | 1,5 | | 1,50 | 1,00 |

*Рисунок 2 – Пример заполнения показателей*

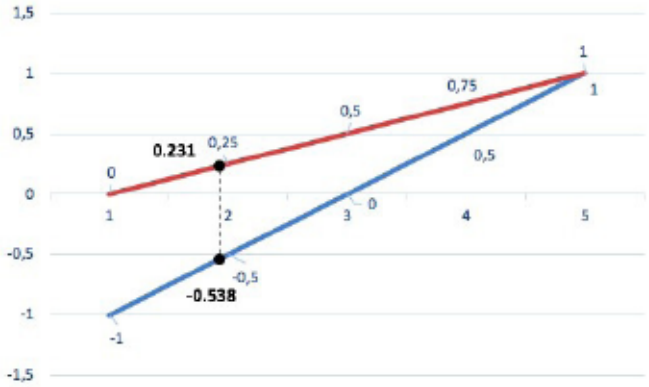



*Рисунок 3 – Интерполяция $E_n$*

*Таблица 1 – Сопоставление числовых и лингвистических оценок функции Харрингтона (авторская версия)*

| Лингвистическая оценка | Числовая оценка |
|---|---|
| «Отлично» | $0.80 \leq D < 1.00$ |
| «Хорошо» | $0.63 \leq D < 0.80$ |
| «Удовлетворительно» | $0.37 \leq D < 0.63$ |
| «Плохо» | $0.20 \leq D < 0.37$ |
| «Опасно» | $0.00 \leq D < 0.20$ |

Полученное значение частного показателя желательностей $d_i$, основанное на оценке $i$-го $I$, пересчитывается вместе с другими в обобщенный коэффициент желательности $D$:

$$D = \sqrt[n]{\prod_i^n d_i} \quad (5)$$

«Кривая желательности» медленно изменяется в области «отлично» и «хорошо», и быстро меняется в области средних оценок («плохо» и «удовлетворительно»), что характерно для многих характеристик безопасности. Таким образом, шкала Харрингтона отражает характер искажений экспертных оценок, вызванных их субъективным характером. Если бы экспертные оценки не страдали данным недостатком, то следовало бы лингвистическим переменным сопоставить на шкале желательности интервалы одинаковой длины.

По результатам проведенных вычислений получено значение обобщенного коэффициента желательности $D$=0,2793 с лингвистической оценкой «плохо» (рис. 4).

Стоит отметить, что выбор функции Харрингтона состоит в том, что достаточно хотя бы одного $I \geq 0$, чтобы $D$ имело близкое к нулю значение, что является свидетельством низкой сформированности модели безопасного поведения работника. Значение $D$ стремится к единице, когда большинство значений $I$ стремятся к единице.

Проверка знаний требований охраны труда, как и входное тестирование выполняется при помощи тестиро-вания из 35 вопросов. Используется банк вопросов, подготовленный изначально для входного тестирования и оценки сформированности модели безопасного поведения. Вопросы для входного и итогового тестирования выбираются хаотично, не допуская повторений вопросов. По итогам прошедшего обучения и проведенной проверки знаний требований охраны труда заново оценивается показатель желательности ($D$). В случае успешного прохождения обучения, используя вышеописанную методику, показатель желательности сформированности теоретических знаний модели безопасного поведения должен установиться на отметке «хорошо – отлично».

Аналогичным путем (через обобщенный коэффициент желательности $D$) производится оценка сформированности практических навыков в МБП. Исключением является то, что показателями $I$ в данном случае не могут быть теоретические вопросы. Показателями для оценки практических навыков являются правильные действия работника при прохождении практического экзамена по результатам обучения. Подробные правильные действия прописываются заранее экспертом, а монитор, принимающий экзамен, лишь ставит «галочку» в одной из двух граф: «выполнено» или «не выполнено». Вырезка из анкеты по проверке правильности выполнения практического задания «Подъем по приставной лестнице на элемент конструкции, с применением предустановленной гибкой анкерной линии, для подготовки рабочего места. Установка на жесткую анкерную линию «*MOST*» средства защиты втягивающего типа. Выполнение работ на горизонтальной (наклонной) плоскости с применением страховочной системы» приведен в таблице 2.

Далее, по аналогии с определением обобщенного коэффициента желательности по теоретическим знаниям, производится расчет значения $D$ по практическим навыкам. Для этого определяется весовой коэффициент для каждого показателя – $w$ от 1 до 2 экспертным путем, производится расчет $E_n$, $Q_A$, $Q_\Gamma$, определяется числовая и лингвистическая оценка обобщенного коэффициента желательности D.

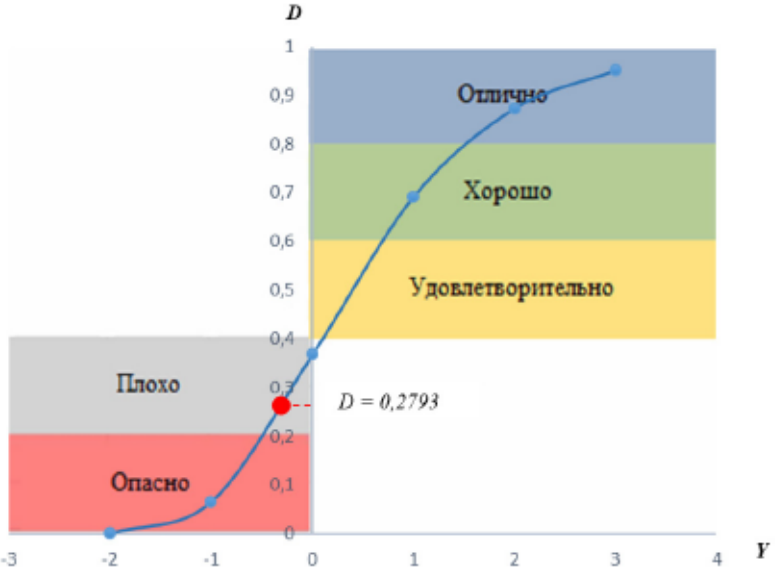



*Рисунок 4 – Графическое отображение функции Харрингтона с результатом расчета обобщённого коэффициента желательности*

*Таблица 2 – Пример анкеты для проверки сформированности практических навыков*

| Наименование раздела | № п.п. | Показатель | «выполнено» | «не выполнено» |
|---|---|---|---|---|
| Предварительный осмотр СИЗ и оборудования | 1 | Провести внешний осмотр, СИЗ от падения с высоты, на предмет их пригодности к эксплуатации | | |
| | 2 | Провести внешний осмотр лестницы | | |
| | 3 | Проверить дату проведения периодических испытаний лестницы | | |
| | 4 | Провести внешний осмотр устройств для фиксации верхней части лестницы | | |
| | 5 | Надеть и отрегулировать на себе СИЗ, в соответствии с рекомендациями изготовителя | | |
| Подготовка к выполнению учебного задания. (Подготовка рабочего места) | 6 | Подняться по стационарной лестнице доступа на второй уровень полигона. При подъеме по стационарной лестнице соблюдать правило четырех точек опоры. | | |
| | 7 | Поднять на второй уровень полигона необходимое оборудование, СИЗ, инструменты и приспособления. При проведении работ по подъему оборудования, слушатель, находящийся на втором уровне полигона, применяет удерживающую систему. Присоединить строп для рабочего позиционирования к анкерному устройству, отрегулировать длину стропа. | | |
| | … | … | | |
| … | … | … | | |

**Обсуждение.** Предположительно при значениях *D* «опасно – плохо» существует высокая вероятность смертельных и тяжелых НС. При значениях *D* «удовлетворительно – хорошо» – легких НС и микротравм, а при значениях «хорошо – отлично» – микротравм и опасных действий (если таковой учет ведется). Однако стоит отметить, что вероятность реализации смертельного НС возможная при всех оценках *D*.

Обобщенный коэффициент желательности, в конечном итоге, показывает, насколько сформирована у работника модель безопасного поведения. Для улучшения показателя *D* предлагается использовать методику обучения с использованием современных образовательных технологий для обеспечения безопасности труда в строительной отрасли, разработанную авторами.

Основные этапы и задачи разработанной методики:

1. Повышение эффективности освоения нормативных требований охраны труда путем погружения в интерактивную среду Полигона «Умный труд», отражающую психологию безопасности труда. Обучение, посредством погружения в обучающую среду Полигона «Умный труд», осуществляется на примере наглядности и инсценировки последствий аварийных ситуаций, представленных в модулях интерактивного обучения. Сценарий травмоопасной ситуации, представленный в инсталляции каждого модуля, дает возможность не только выявить причины, но и максимальное количество неблагоприятных факторов, оценить риски от их реализации и, соответственно, разработать меры, позволяющие снизить риск травмирования работающего.

2. Закрепление знаний и навыков в трехмерной среде виртуальной реальности при выполнении практических заданий. Инструментом выработки умений и навыков безопасного выполнения строительных работ, которые не могут быть инсценированы в реальных условиях обучающего Полигона, являются компьютерные обучающие программы, в которых смоделированы виртуальные строительные процессы («КОП «Умный труд» и «ТрудлабVR»). На каждую программу СПбГАСУ получил свидетельство о регистрации программы для ЭВМ, № 2020667113 от 21.12.2020 и № 2023682028 от 09.11.2023 [21, 22] соответственно. «КОП «Умный труд» является цифровой копией Полигона и содержит анимированные сцены выполнения девяти видов работ, представленных на Полигоне, дополненных звуковыми эффектами. Программа «ТрудлабVR» включает в себя два интерактивных урока: выполнение бетонных работ и производство работ на высоте. Функции, которые необходимо выполнить в программе, проходя обучение заключаются в: правильном подборе СИЗ для выполнения конкретного вида работ, а также в выполнении ряда заранее запрограммированных задач при выполнении бетонных работ или работ на высоте. В случае если допускаются ошибки на любом из этапов обучения, программа их фиксирует и предупреждает об этом.

3. Отработка практических навыков в ходе выполнения практических заданий на учебных модулях Полигона «Умный труд». Для разных категорий обучающихся и программ обучения / повышения квалификации разработаны различные практические задания, включающие установление обстоятельств и причин несчастного случая, управление профессиональными рисками, оказание первой помощи пострадавшим, а также целый перечень практических заданий для отработки безопасных методов и приемов выполнения работ на высоте или в ограниченных и замкнутых пространствах.

**Выводы.** Наличие у сотрудников актуальных знаний и умений в настоящее время становится не просто желательным, а необходимым условием для успешной деятельности организации. Теоретические

знания формируют основу для понимания процессов и технологий, с которыми сотрудник будет работать. Практические навыки, в свою очередь, обеспечивают возможность применения этих знаний в реальных ситуациях. Согласованное развитие обоих компонентов способствует повышению эффективности работы и снижению вероятности возникновения несчастных случаев. Сформированная модель безопасного поведения на производстве играет ключевую роль в снижении количества несчастных случаев и создании безопасной рабочей среды. Такая модель основывается на четком понимании рисков и угроз, связанных с конкретными процессами. Она включает в себя обучение сотрудников основам безопасности, что позволяет им не только осознавать потенциальные опасности, но и правильно реагировать на них. Когда работники понимают, как избежать опасных ситуаций и что делать в случае их возникновения, вероятность несчастных случаев значительно снижается.

Более того, сформированность у работников модели безопасного поведения способствует формированию культуры безопасности на уровне всей организации. Таким образом, сформированная модель безопасного поведения является важным инструментом в управлении рисками на производстве. Она не только помогает снизить количество несчастных случаев, но и способствует созданию такой рабочей атмосферы, где каждый сотрудник чувствует свою ответственность за безопасность как свою личную задачу.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Мониторинг условий и охраны труда в Российской Федерации – 2018-2023 [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://eisot.rosmintrud.ru/monitoring-uslovij-okhrany-truda (дата обращения 10.10.2024).

2. Полигон «Умный труд» открыт! [Электронный ресурс]. Режим доступа:https://www.spbgasu.ru/news-and-events/news/poligon_umnyy_trud_otkryt-1/ (дата обращения 15.10.2024).

3. СПбГАСУ присвоен статус федеральной инновационной площадки [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.spbgasu.ru/news-and-events/news/spbgasu_prisvoen_status_federalnoy_innovatsionnoy_ploshchadki-1/ (дата обращения 15.10.2024).

4. Приказ Министерства науки и высшего образования РФ от 3 марта 2022 № 195 «Об утверждении перечня организаций, отнесенных к федеральным инновационным площадкам, составляющим инновационную инфраструктуру в сфере высшего образования и соответствующего дополнительного профессионального образования, на 2022 год».

5. Tarasiuk, H., Pashchenko, O., Milinchuk, O., Chahaida, A., Sienko, O. (2020). Methodical aspects of stability development assessment of enterprises. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 5. – P. 157-162.

6. Klymchuk, A. (2018). The labor assessment in forming the enterprise personnel's motivation. Naukovyi Visnyk NHU, 3, pp. 159-152. DOI: 10.29202/nvngu/2018-3/21.

7. Bochkovskyi, A. (2020). Improvement of risk management principles in occupational health and safety. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, (4), 94-104. https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-4/094.

8. Podgorsky, D. (2015) Measuring operational performance of OSH management system – A demonstration of AHP-based selection of leading key performance indicators. Safety Science, 73, 146-166.

9. Bielikov, A.S., Tairova, T.M., Papirnyk, R.B., Cherednichenko, L.A. (2020). Bulletin of Prydniprovs'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture, 4, 267-268.

10. Sklad, A. (2019). Assessing the impact of processes on the Occupational Safety and Health Management System's effectiveness using the fuzzy cognitive maps approach. Safety Science, 117, 71-80. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.03.021.

11. Silva, J.E., Rodrigues, C. (2018). A New Approach - Use of effectiveness and efficiency concepts in the identification of activities related to occupational safety management on motorways. International Journal of Occupational and Environmental Safety, 2(2), 12-20. https://doi.org/10.24840/2184-0954_002.002_0002.

12. Order of the Federal State Statistics Service of Russian Federation № 326 (as amended on 12/18/2020) «On the approval of the federal statistical observation form for the organization of federal statistical monitoring of industrial injuries and occupational diseases».

13. Ovchinnikova, T.I., Pototskiy, E.P., Firsova, V.M. (2021). Risk-based approach to hazard assessment in the mining industry. MIAB. Mining Inf. Anal. Bull., 2-1, 199-208. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-199208.

14. Perevozova, I., Daliak, N., Lisova, O., Naumov, D. (2019). Application of the Harrington function to assess the performance of oil and gas companies. Conference proceedings of the 6th International conference on strategies, models and technologies of economic systems management (SMTESM 2019). Advances in Economics, Business and Management Research, 95, 359 - 363. DOI: 10.2991/smtesm-19.2019.70.

15. Nikulin, Andrei & Mračková, Eva & Brovchenko, Ivan & Samarin, Dmitry & Kudinov, Vitaly. (2022). Practical approach to assessment of effectiveness and efficiency of management systems for occupational safety. Journal of Applied Engineering Science. 20. 1-8. 10.5937/jaes0-38899.

16. Nikulin, Andrei & Dolzhikov, Ilia & Klimova, I.V. & Smirnov, Yu.G.. (2021). Assessment of the Effectiveness and Efficiency of the Occupational Health and Safety Management System at a Mining Enterprise. Occupational Safety in Industry. 66-72. 10.24000/0409-2961-2021-1-66-72.

17. Chemezov, E.N. (2019) Industrial safety principles in coal mining. Journal of Mining Institute, 240, 649-653. http://doi:10.31897/PMI.2019.6.649.

18. Rudakov, M.I., Rabota, E.N., Kolvakh, K.A. (2020). Assessment of the individual risk of fatal injury to coal mine workers during collapses. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 4, 88-93. https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-4/088.

19. ГОСТ 12.0.230.3-2016. «Межгосударственный стандарт. ССБТ. СУОТ. Оценка результативности и эффективности» для оценки результативности деятельности организации в области охраны труда.

20. Gospodarikov, A.P., Zatsepin, M.A (2019) Mathematical modeling of boundary problems in geomechanics. Gornyi Zhurnal, 2019(12), 16-20.

21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020667113 Российская Федерация. Компьютерная обучающая программа «Умный труд»: № 2020666111: заявл. 08.12.2020: опубл. 21.12.2020 / В.В. Цаплин, О.М. Шакшак, Н.А. Субботина [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет». – EDN NPYRWA.

22. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023683627 Российская Федерация. Программа виртуальной реальности «ТруддлабVR»: № 2023682028: заявл. 23.10.2023: опубл. 09.11.2023 / А.Н. Никулин, О.М. Шакшак, Н.А. Субботина [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет». – EDN DZOEUH.

*Статья поступила в редакцию 11.11.2024*
*Статья принята к публикации 13.12.2024*

***Статья публикуется по результатам исполнения гранта Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета 2024 года***

УДК 614.849
EDN: WWZUTX

# ТЕРМИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ РОБОТИЗИРОВАННЫХ УСТАНОВОК ПОЖАРОТУШЕНИЯ

© Автор(ы) 2024
SPIN: 2341-7695
AuthorID: 1214692
ORCID: 0000-0003-0257-262X

**КИСЕЛЕВА Виктория Сергеевна,** адъюнкт
*Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России*
*(196105, Россия, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149, e-mail: s-kiseleva1@mail.ru)*

**Аннотация.** В данном исследовании проведен анализ термической устойчивости модифицированных композитных материалов. Основной целью работы являлась оценка термостойкости этих материалов и выявление факторов, влияющих на их устойчивость к воздействию высоких температур. В ходе экспериментальной части были проанализированы различные образцы композитов, подвергнутые термическому воздействию в контролируемых условиях. При проведении экспериментов оценивались такие параметры, как температура деградации, потеря массы, изменение механических свойств. Проведен анализ экспериментальных зависимостей, описывающих взаимодействие углеродных наноструктур с полимерной матрицей при термическом воздействии. Использовались современные методы термического анализа, включая дифференциальный термический анализ. На основе полученных экспериментальных данных были получены регрессионные зависимости, позволяющие прогнозировать термостойкость композитных материалов в зависимости от их состава и условий эксплуатации. Результаты исследования демонстрируют значительное улучшение термической стабильности модифицированных композитов по сравнению с традиционным материалами. Полученные регрессионные зависимости могут быть использованы для оптимизации состава композитов и прогнозирования их поведения в условиях экстремальных температур. Результаты исследования имею важное практическое значение для разработки новых конструкционных композитных материалов тепловой защиты роботизированных установок пожаротушения, работающих при воздействии высоких температур.

**Ключевые слова:** термическая стабильность, композитный материал, регрессионный анализ, дифференциальный термический анализ, роботизированные установки пожаротушения, углеродные наноструктуры, тепловая защита, потеря массы.

# THERMAL STABILITY AND PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF STRUCTURAL COMPOSITE MATERIALS FOR THERMAL PROTECTION OF ROBOTIC FIRE EXTINGUISHING SYSTEMS

© The Author(s) 2024

**KISELEVA Victoria Sergeevna**, adjunct
*Saint-Petersburg University of State fire service of EMERCOM of Russia*
*(196105, Russia, St. Petersburg, Moskovsky prospect, 149, e-mail: e-mail: s-kiseleva1@mail.ru)*

**Abstract.** In this study, an analysis of the thermal stability of modified composite materials was carried out. The main purpose of the work was to assess the thermal stability of these materials and identify factors affecting their resistance to high temperatures. During the experimental part, various samples of composites subjected to thermal exposure under controlled conditions were analyzed. During the experiments, parameters such as degradation temperature, mass loss, and changes in mechanical properties were evaluated. The analysis of experimental dependences describing the interaction of carbon nanostructures with a polymer matrix under thermal influence is carried out. Modern methods of thermal analysis, including differential thermal analysis, were used. Based on the experimental data obtained, regression dependences were obtained that make it possible to predict the heat resistance of composite materials depending on their composition and operating conditions. The results of the study demonstrate a significant improvement in the thermal stability of modified composites compared to traditional materials. The obtained regression dependences can be used to optimize the composition of composites and predict their behavior under extreme temperatures. The results of the study are of great practical importance for the development of new structural composite materials for thermal protection of robotic fire extinguishing systems operating at high temperatures.

**Keywords:** thermal stability, composite material, regression analysis, differential thermal analysis, robotic fire extinguishing systems, carbon nanostructures, thermal protection, mass loss.

***Для цитирования:*** *Киселева В.С. Термическая стабильность и эксплуатационные характеристики конструкционных композитных материалов тепловой защиты роботизированных установок пожаротушения / В.С. Киселева // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 4(68). – С. 238-243. – EDN: WWZUTX.*

**Введение.** В настоящее время роботизированные установки пожаротушения (РУП) представляют собой перспективное направление в области обеспечения пожарной безопасности [1, 2], особенно в условиях, угрожающих жизни и здоровью людей. Однако их эффективная функциональность при воздействии высоких температур, характерных для крупномасштабных пожаров, сталкивается с рядом технических проблем, связанных с недостаточной эффективностью теплозащиты. Основные проблемы включают перегрев электронных и механических компонентов [3, 4], что приводит к деформации и разрушению материалов, а также к снижению подвижности и маневренности систем. Для устранения данных проблем необходимо применять защитные материалы, обеспечивающие требуемый уровень тепловой защиты, а также являющиеся безопасными для людей и окружающей среды [5].

Эксплуатационные характеристики материалов для тепловой защиты во многом определяются их термоизолирующими свойствами [6], гидрофобностью [7], негорючестью [8]. Одним из перспективных направлений развития систем огнезащиты является применение нанокомпозитов [9], которые обладают высокой прочностью сцепления, быстрым твердением, отличной термостойкостью, а также хорошей эластичностью, что позволяет обеспечить защиту конструктивных элементов РУП в условиях высокотемпературных воздействий [10]. До настоящего времени данные нанокомпозиты не нашли широкого применения для защиты РУП на объектах с обращением нефтепродуктов (НП) по причине недостаточной изученности их долгосрочной эффективности и безопасности в специфических условиях, в связи с этим есть необходимость проработки вопроса о возможности применения материалов на основе неорганического вяжущего на данных объектах.

Целью настоящего исследования является проведение оценки влияния ключевых факторов на эффективность применения нанокомпозитов для обеспечения тепловой защиты РУП в условиях потенциального внешнего воздействия на оборудование и установление граничных условий их применения.

**Методология.** В качестве материалов для исследования использовались: композитные материалы на основе неорганического вяжущего [11], содержащие углеродные наноструктуры (астралены) [12] в концентрации 0,10-0,15 масс. % (табл. 1, рис. 1).

*Таблица 1 – Материалы для исследований*

| Наименование образца | Материал пластины, состав | Концентрация углеродных наноструктур, масс. % |
|---|---|---|
| Образец 1 | Композит, состоящий из антиусадочной добавки на основе наночастиц диоксида кремния | 0 |
| Образец 2 | Композит, состоящий из антиусадочной добавки на основе наночастиц диоксида кремния | 0,10 |
| Образец 3 | Композит, состоящий из антиусадочной добавки на основе наночастиц диоксида кремния | 0,15 |
| Образец 4 | Композит, состоящий из пластифицирующего стабилизатора на основе наночастиц гидроксида алюминия | 0 |
| Образец 5 | Композит, состоящий из пластифицирующего стабилизатора на основе наночастиц гидроксида алюминия | 0,10 |
| Образец 6 | Композит, состоящий из пластифицирующего стабилизатора на основе наночастиц гидроксида алюминия | 0,15 |
| Образец 7 | Сталь 10 | - |

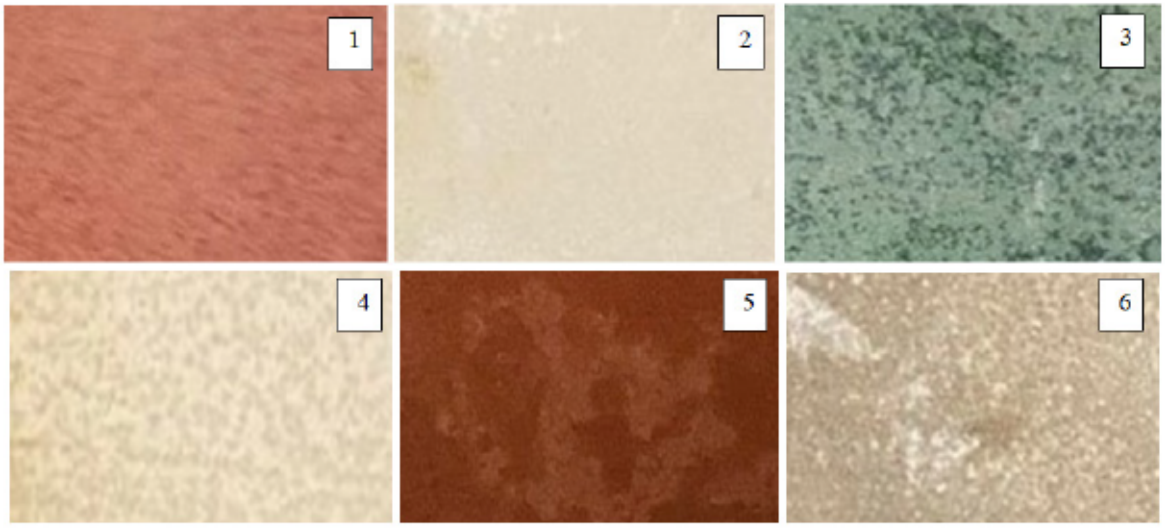



*Рисунок 1 – Фото образцов материалов, используемых в исследовании*

Исследование огнезащитной эффективности образцов проводилось на лабораторной установке, имитирующей условия факельного горения углеводородов [13, 14]. Пластины из композиционных материалов были подвергнуты термическому воздействию с помощью пропан-бутановой горелки с расходом 73 г/час и давлением 0,1 МПа. В качестве контрольного образца использовалась пластина из стали марки 10 толщиной 4 мм. Образец был вертикально закреплен на штатив. Пламя горелки подавалось перпендикулярно плоскости поверхности образца. Изменение температуры фиксировалось регистратором температур с диапазоном измерения от 50°С до 1500°С. В процессе испытаний фиксировалось время прогрева обратной стороны пластин до 500°С. Помимо времени наступления предельного состояния образца, фиксировались изменение температуры в печи, а также изменение температуры опытных пластин.

Оценка термической стабильности образцов композитов проводилась с помощью дериватограф «Thermoscan-2» (производитель ООО «Аналитприбор», г. Санкт-Петербург) [15], среда испытания: воздух, скорость нагрева: 10°С/мин, максимальная температура: 800°С.

Анализ зависимости термической деструкции образцов от их индивидуальных свойств осуществлялся методом регрессионного анализа [16]. В ходе построения регрессионной модели учитывались такие параметры, как величина эндотермического эффекта, потеря массы, период дегидратации, время наступления предельного состояния.

**Результаты.** Данные о потере массы образцов в ходе огневых испытаний, представлены на рисунке 2.

Результаты исследования показали, что наибольшая потеря массы характерна для образца 1 (71 %), минимальная для образца 6 (24%). Для всех образцов интенсивная потеря массы проходит до температур 720-730°С. У образца 2 в температурных пределах до 500°С наблюдается незначительная потеря массы (примерно 10%), это связано с образованием более стабильных соединений межу антиусадочными добавками и минералами исходного композита, что свидетельствует о высокой термической стабильности данного образца.

Термограммы дифференциально-термического анализа (ДТА) [17-20] исследуемых образцов представлены на рисунке 3.

Анализ кривых ДТА свидетельствует о наличии четырех эндотермических пиков у образцов в интервалах температур от 100°С до 525°С. Четвертый пик сопровождается потерей массой, показанной на рисунке 2, что указывает на процесс дегидратации в композите.

В таблице 2 приведены значения начала ($T_н$) и окончания ($T_к$) эндотермического пика, значения температуры в его максимуме ($T_м$), а также величина эндотермического эффекта ($E_т$).

Результаты проведенных огневых испытаний приведены на рисунке 4.

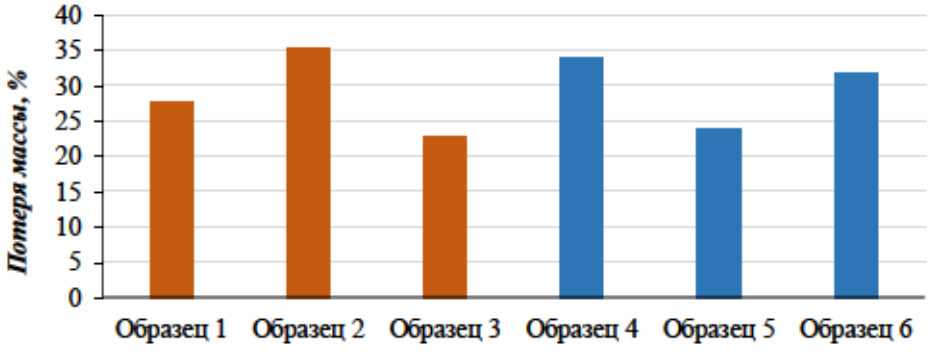



*Рисунок 2 – Потеря массы образцов*

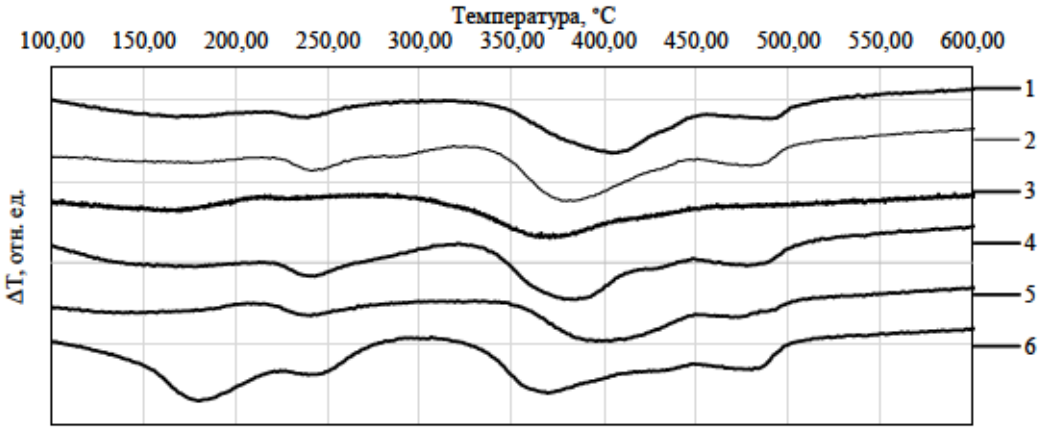



*Рисунок 3 – Термограммы ΔТ исследуемых образцов*

*Таблица 2 – Экспериментальные данные композитных материалов на основе неорганического вяжущего*

| Наименование образцов | Количество пиков | Тн, °С | Тм, °С | Тк, °С | Ет, Дж | Время наступления 500 °С, сек | Потеря массы, % | Значение конечной массы при 500 °С, % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Обр. 1 | Пик 1 | 104,3 | 152,4 | 210,2 | -4,6 | 152 | 27,9 | 81 |
| | Пик 2 | 216,6 | 236,9 | 292,1 | -1,7 | | | |
| | Пик 3 | 326,2 | 399,4 | 453,2 | -22,4 | | | |
| | Пик 4 | 459,9 | 491,4 | 511,3 | -2,0 | | | |
| Обр. 2 | Пик 1 | 105,7 | 162,5 | 200,1 | -2,2 | 959 | 35,5 | 54 |
| | Пик 2 | 217,6 | 241,9 | 271,9 | -2,8 | | | |
| | Пик 3 | 327,4 | 375,4 | 447,2 | -22,7 | | | |
| | Пик 4 | 454,7 | 485,1 | 515,1 | -3,8 | | | |
| Обр. 3 | Пик 1 | 109,6 | 163,8 | 207,7 | -3,9 | 2280 | 22,8 | 88 |
| | Пик 2 | 213,8 | 229,1 | 250,5 | -0,5 | | | |
| | Пик 3 | 287,9 | 365,9 | 463,4 | -22,5 | | | |
| | Пик 4 | 474,2 | 492,7 | 511,6 | -0,2 | | | |
| Обр. 4 | Пик 1 | 113,1 | 151,1 | 201,8 | -3,9 | 209 | 34,2 | 78 |
| | Пик 2 | 213,2 | 240,7 | 317,3 | -6,3 | | | |
| | Пик 3 | 326,8 | 380,1 | 448,3 | -23,5 | | | |
| | Пик 4 | 453,1 | 481,4 | 524,9 | -3,3 | | | |
| Обр. 5 | Пик 1 | 105,8 | 151,2 | 197,7 | -3,1 | 1030 | 23,9 | 85 |
| | Пик 2 | 211,6 | 240,6 | 302,2 | -3,6 | | | |
| | Пик 3 | 329,9 | 393,1 | 448,4 | -16 | | | |
| | Пик 4 | 455,9 | 482,5 | 510,1 | -1,5 | | | |
| Обр. 6 | Пик 1 | 127,4 | 174,3 | 222,7 | -13,8 | 2237 | 38,1 | 88 |
| | Пик 2 | 228,1 | 245,1 | 283,8 | -1,9 | | | |
| | Пик 3 | 313,9 | 365,3 | 440,4 | -20,4 | | | |
| | Пик 4 | 446,6 | 477,7 | 520,1 | -4,1 | | | |




*Рисунок 4 – Совмещенный график результатов испытаний огнезащитных материалов в условиях углеводородного температурного режима*

Из анализа графика на рисунке 4 можно сделать вывод, что существует корреляция временем достижения предельного состояния и значением конечной массы при температуре 500°С.

На основе экспериментальных данных (табл. 3) была проведена математическая обработка, на основании которой была разработана и верифицирована регрессионная модель [21]. Данная модель представляет собой математическое выражение в форме уравнения, которое описывает функциональную зависимость между набором независимых переменных $x_1 \div x_m$ ($m$ – число учитываем факторов) и зависимой переменной $y$, характеризующей время достижения предельного состояния исследуемых образцов:

$$y = f(x_1, ..., x_m) \quad (1)$$

*Таблица 3 – Воздействующие факторы (x), воспроизводимые в ходе испытаний, и регистрируемый входной параметр (y)*

| Воздействующие факторы, входной параметр | Характеристика | Единицы измерения |
|---|---|---|
| $x_1$ | Площадь пика 1 | Дж |
| $x_2$ | Площадь пика 2 | Дж |
| $x_3$ | Площадь пика 3 | Дж |
| $x_4$ | Площадь пика 4 | Дж |
| $x_5$ | Потеря массы при 800 °С | % |
| $x_6$ | Значение конечной массы при 500 °С | % |
| y | Время наступления 500 °С | сек |

Зависимость (1) представлена в виде квазилинейного уравнения регрессии:

$$y = \sum_{k=1}^{M_i} a_{jk} z_{jk}, \quad (2)$$

где $a_{jk}$ – коэффициент регрессии, $z_{jk}$ – $i$ условный фактор функции $x_1 \div x_m$, $M_i$ – число коэффициентов регрессии (условный фактор) $M < N$).

Оценка адекватности уравнений вида (2) проводилась как по критерию Фишера ($F_i$) [21] в соответствии с таблицами [22], так и максимальному рассогласованию $\Delta = max_i^N abs(y_i - y_i^B)$.

Используя специализированный программный комплекс *REGRAN*, был проведен отбор условных факторов ($z_1$, ..., $z_m$) и вычисление коэффициентов регрессии $\{a_{jk}\}$. В процессе формирования регрессионных моделей был использован принцип множественности моделей. Данная методология подразумевает, что функциональная зависимость (1) может быть описана не единственным уравнением (2), а совокупностью различных уравнений. Применение такого подхода позволяет получить более объективную оценку значимости $x_1 \div x_m$ и увеличивает достоверность прогнозирования значений переменной $y$.

Оценка коэффициентов парной корреляции показала, что $r_{45}>0,9$, это позволяет исключить из рассмотрения фактор $x_5$.

На основании результатов проведенного моделирования, представленных в таблице 4, была выполнена количественная оценка погрешности вычисления входной величины.

*Таблица 4 – План испытаний и оценка точности определения входного параметра по математическому моделированию*

| № п/п | План испытаний | | | | | | | Расчет по математическому моделированию | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $x_4$ | $x_5$ | $x_6$ | $y$ | $y_1$ | $y_2$ | $y_3$ | $y_4$ |
| 1 | 4,6 | 1,7 | 22,4 | 2,0 | 27,9 | 81 | 152 | 385,2 | 111,9 | 216,1 | 108,8 |
| 2 | 2,2 | 2,8 | 22,7 | 3,8 | 35,5 | 54 | 959 | 833,2 | 921,8 | 977,1 | 1008,7 |
| 3 | 3,9 | 0,5 | 22,5 | 0,2 | 22,8 | 88 | 2280 | 2272,0 | 2285,1 | 2284,2 | 2215,7 |
| 4 | 4,0 | 6,3 | 23,5 | 3,3 | 34,2 | 78 | 209 | 267,0 | 173,0 | 154,9 | 196,6 |
| 5 | 3,0 | 3,6 | 16,0 | 1,5 | 23,9 | 85 | 1030 | 1081,2 | 1063,4 | 1032,0 | 1015,4 |
| N=6 | 13,8 | 2,0 | 20,4 | 4,1 | 38,1 | 88 | 2237 | 2225,0 | 2251,0 | 2234,5 | 2251,4 |

В результате получены следующие 4 уравнения регрессии:

$$y_1 = 19{,}09\frac{z_1 z_4^2}{z_2} + 3{,}071 \times 10^5 (z_1^2 z_3^2 z_4 z_5)^{-1}, \quad (3)$$

где: $z_1=x_1$, $z_2=x_2$, $z_3=0,1x_3$, $z_4=x_4$, $z_5=0,1x_6$, $F_1=43,5$, $\Delta_1=230$

$$y_2 = 2091\frac{z_5}{z_1 z_4} - 2{,}194 \times 10^4 \frac{z_1}{z_3 z_4 z_5} + 435{,}5\frac{z_1 z_4}{z_2 z_3} \quad (4)$$

где: $z_1=x_1$, $z_2=x_2$, $z_3=0,1x_3$, $z_4=x_4$, $z_5=0,1x_6$, $F_2=280,7$, $\Delta_2=72$

$$y_3 = \frac{2.447\times10^5}{z_1 z_2 z_3 z_4 z_5} - 0{,}4945\frac{z_1^2 z_3^2 z_5^2}{z_2 z_4} + 267{,}4\frac{z_1^2 z_4}{z_2 z_3 z_5}, \quad (5)$$

где: $z_1=x_1$, $z_2=x_2$, $z_3=0,1x_3$, $z_4=x_4$, $z_5=0,1x_6$, $F_3=374,6$, $\Delta_3=64$

$$y_4 = 134{,}1\frac{z_1 z_3}{z_2 z_5} + \frac{1.134\times10^5}{z_1 z_2 z_3 z_4} - \frac{3.493\times10^5}{z_2 z_3 z_4 z_5} + \frac{6.911\times10^4}{z_1 z_2 z_4 z_5} z_3, \quad (6)$$

где: $z_1=x_1$, $z_2=x_2$, $z_3=0,1x_3$, $z_4=x_4$, $z_5=0,1x_6$, $F_4=748,8$, $\Delta_4=41$

**Обсуждение.** Использование модифицированных огнетушащих составов в РУП на объектах с обращением нефтепродуктов является эффективным средством для обеспечения тепловой защиты и сокращения времени ликвидации пожара [23]. Однако в условиях значительных тепловых потоков их эффективность может быть снижена. Для достижения наилучших результатов рекомендуется применять нанокомпозиты в качестве защитного экрана, что позволит значительно повысить общую безопасность и надежность систем пожаротушения от воздействия повышенных температур.

В ходе проведения ДТА (рис. 3) у образца № 3 был отмечен менее выраженный четвертый эндотермический пик по сравнению с другими исследуемыми образцами. Данное наблюдение свидетельствует, что модификация композита антиусадочной добавкой снижает интенсивность или изменяет механизм происходящих термических событий, что в свою очередь, повышает общую термическую устойчивость материала.

Из полученных результатов регрессионная анализа, можно заключить, что уравнения (3)-(6) обеспечивают адекватное описание исследований зависимости, при этом фактор $x_6$ (значение конечной массы при 500°С) выявлен как наиболее значимый, оказывающий наибольшее влияние на результат.

**Выводы.** Результаты исследования подводят к следующему научному выводу:

1. Полученные данные по пределам огнестойкости характеризуют относительную огнезащитную эффективность, что имеет важное значение для разработки и выбора соответствующих огнезащитных решений.

2. Анализ регрессионных моделей показал, что созданные уравнения эффективно отражают динамику переменной в ответ на изменение воздействующих факторов, подчеркивая значимость значения конечной массы при 500°C.

3. Результаты исследования имеют важное практическое значение для разработки новых высокотермостойких композитных материалов, применяемых в конструкциях защитных экранов РУП.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. ГОСТ Р 53326-2009. Техника пожарная. Установки пожаротушения роботизированные. Общие технические требования. Методы испытаний.

2. Горбань Ю.И. и др. Роботизированные установки пожаротушения. Параметры эффективного тушения // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. – 2023. – Т. 32. – №. 4. – С. 58-67.

3. Севинчан Э., Динсер И., Лэнг Х. Обзор методов терморегулирования роботов // Прикладная теплотехника. – 2018. – Т. 140. – С. 799-813.

4. Челентано Л., Сицилиано Б., Виллани Л. Роботизированная система для тушения пожаров в туннелях // IEEE International техника безопасности и аварийно-спасательные работы, семинар, 2005. – IEEE, 2005. – С. 253-258.

5. Иванов А.В. и др. Обеспечение тепловой защиты роботизированных установок пожаротушения в условиях применения наномодифицированных материалов // Материалы Международного научного семинара – конференции «Пожарная безопасность в условиях современности» – Республика Казахстан, 15 июня 2023 г. – Стр. 59-61.

6. Гуннаршауг А., Металлину М.М., Лог Т. Исследование промышленной теплоизоляции при повышенных температурах // Материалы. – 2020. – Т. 13. – №. 20. – С. 4613.

7. Зыбина О., Гравит М. Вспучивающиеся покрытия для огнезащиты строительных конструкций и материалов. – Чам, Швейцария: Springer International Publishing, 2020. – Т. 11. – С. 210.

8. Константинова Н.И. и др. Горючесть полимерных материалов, используемых в строительстве // Журнал «Строительство». – 2021. – № 2 (102). – С. 10203.

9. Нгуен К.С. и др. Использование фосфатно-магниевого материала для огнезащиты бетона // Материалы 5-й Международной конференции Азиатской федерации бетона ACF. – 2012. – С. 24-26.

10. Чжан Ю. и др. Улучшенная термостабильность и электрохимические характеристики сепараторов на основе органо-неорганического композитного связующего, состоящего из поливинилового спирта и неорганического фосфата, для литий-ионных аккумуляторов // Журнал сплавов и соединений. – 2022. – Т. 895. – С. 162646.

11. Халил А., Сон С., Челик К. Термические свойства и стабильность реакционноспособного магнезиального цемента // Строительство и строительные материалы. – 2021. – Т. 308. – С. 125102.

12. Shames A.I., Katz E.A., Panich A.M., Mogilyansky D., Mogilko E., Grinblat J., Belousov V.P., Belousova I.M., Ponomarev A. N. Structural and magnetic resonance study of astralen nanoparticles // Diamond and Related Materials. – 2009. – Vol. 8. – No. 2-3. – P. 505-510.

13. ГОСТ Р ЕН 1363-2–2014. Конструкции строительные. Испытания на огнестойкость. Ч. 2: Альтернативные и дополнительные процедуры. М.: Стандартинформ, 2014

14. Цой А.А., Демехин Ф.В. Испытание огнезащитных материалов в условиях углеводородного температурного режима // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». – 2015. – №. 4. – С. 20-24.

15. Букетов А. и др. Исследование теплофизических свойств эпоксидных нанокомпозитов //Молекулярные кристаллы и жидкие кристаллы. – 2016. – Т. 628. – №. 1. – С. 167-179.

16. Таранцев А.А. и др. Многофакторная регрессионная модель процессов детоксикации почв в условиях чрезвычайных ситуаций на объектах нефтегазового комплекса // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2016. – №. 4. – С. 34-42.

17. Runčevski T., Dinnebier R.E., Freyer D. Dehydration of the Sorel Cement Phase 3Mg (OH) 2• MgCl2• 8H2O studied by in situ Synchrotron X-ray Powder Diffraction and Thermal Analyses //Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie. – 2014. – Т. 640. – №. 1. – С. 100-105.

18. Йиржичкова А. и др. Термическая стабильность и кинетика образования Mg3 (OH) 5Cl• 4 H2O // Материалы конференции AIP. – AIP Publishing, 2020. – Т. 2293. – №. 1.

19. Лойка М. и др. Кинетика образования и термическая стабильность Mg2 (OH) 3Cl• 4H2O // Материалы конференции AIP. – AIP Publishing, 2019. – Т. 2170. – №. 1.

20. Каныгина О.Н., Четверикова А.Г., Алпысбаева Г.Ж. Применение дериватографа" Thermoscan-2" для исследования кинетики термодеструкции образцов: методические указания для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки, входящим в состав укрупненных групп направлений подготовки 03.00. 00 Физика и астрономия, 04.00. 00 Химия. – 2020.

21. Таранцев А.А. Регрессионный анализ и планирование испытаний в задачах принятия решений. – 2017.

22. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. – 1983.

23. Киселева В.С. Разработка наномодифицированного огнетушащего состава для роботизированных установок пожаротушения на объектах транспортировки нефтепродуктов // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2023. – №. 3. – С. 196-203. DOI: https://doi.org/10.61260/1998-8990-2023-3-196-203 (дата обращения: 17.10.2024).

*Статья поступила в редакцию 25.10.2024*
*Статья принята к публикации 13.12.2024*

УДК 504.054
EDN: JDJSJK

# ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА ПРИ ОБРАЩЕНИИ С ОТХОДАМИ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ

© Автор(ы) 2024
SPIN: 1695-4050
AuthorID: 848605
ORCID: 0000-0002-1679-8083
ResearcherID: B-1997-2016
ScopusID: 57224862591

**КОЗЫРЬ Дмитрий Александрович**, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Радиоэкология и экологическая безопасность»
*Севастопольский государственный университет*
*(299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33, e-mail: kozyr.dmitriy@gmail.com)*

**Аннотация.** Добыча полезных ископаемых является одним из основных факторов развития экономики, но также она неизбежно приводит к ряду экологических проблем. Отходы недропользования, накапливаясь в процессе добычи, приводят к загрязнению окружающей среды. Для снижения негативного воздействия необходимы анализ влияния отходов недропользования на здоровье населения и разработка природоохранных мероприятий с учетом приоритетности воздействия загрязняющих веществ. Экспериментальные исследования выбросов выполнялись на горящем породном отвале шахты имени М.И. Калинина с использованием индикаторных трубок и газоанализаторов Testo-350XL, ОКСИ-5М. Очаги тепловыделения определялись с применением тепловизионной камеры Fluke Ti-125. Оценка экологического риска с применением реестра рисков, матрицы рисков и анализа дерева отказов позволила выявить основные опасности, возникающие при обращении с породным отвалом шахты имени М.И. Калинина. Установлено, что основную угрозу окружающей среде представляют процессы горения породных отвалов, а также выбросы взвешенных веществ и токсичных газов. Расчет неканцерогенного экологического риска при хроническом воздействии, выполненный с учетом измеренных выбросов очагов самовозгорания породного отвала, показал, что при выбросах дигидросульфида на селитебной территории наблюдается настораживающий уровень риска (до 1,1). Такой риск является недопустимым для населения и требует выполнения природоохранных мероприятий. Риск порога запаха, который возникает при выбросах дигидросульфида на горящем породном отвале, составляет до 1,7 на санитарно-защитной зоне и до 3,8 на селитебной территории. Превышение порога запаха дигидросульфида будет оказывать влияние на социально-экономический потенциал селитебной территории. Оценка экологического риска при эксплуатации отходов недропользования качественными и количественными методами позволяет выявить причины возникновения загрязнения окружающей среды, оценить последствия загрязнения и разработать природоохранные мероприятия с учетом приоритетности воздействия.

**Ключевые слова:** экологический риск, отходы недропользования, дигидросульфид, порог запаха, выбросы, неканцерогенный риск, породный отвал, самовозгорание, дерево отказов, матрица риска.

# ENVIRONMENTAL RISK ASSESSMENT IN HANDLING SUBSOIL MINING WASTE

© The Author(s) 2024
**KOZYR Dmitry Aleksandrovich,** candidate of technical sciences,
associate professor of the department of «Radioecology and Environmental Safety»
*Sevastopol State University*
*(299053, Sevastopol, 33 Universitetskaya St., e-mail: kozyr.dmitriy@gmail.com)*

**Abstract.** Mining is one of the main factors of economic development, but it also inevitably leads to a number of environmental problems. Mining waste, accumulating during the mining process, leads to environmental pollution. To reduce the negative impact, it is necessary to analyze the impact of mining waste on public health and develop environmental measures taking into account the priority of the impact of pollutants. Experimental studies of emissions were carried out on a burning waste dump of the M.I. Kalinin mine using indicator tubes and gas analyzers Testo-350XL, OKSI-5M. Heat emission centers were determined using a Fluke Ti-125 thermal imaging camera. Environmental risk assessment using a risk register, risk matrix and fault tree analysis allowed us to identify the main hazards arising from handling the rock dump of the M.I. Kalinin mine. It was found that the main threat to the environment is the combustion of rock dumps, as well as emissions of suspended matter and toxic gases. Calculation of non-carcinogenic environmental risk for chronic exposure, performed taking into account the measured emissions of spontaneous combustion centers of the waste dump, showed that an alarming level of risk (up to 1.1) is observed with dihydrosulfide emissions in a residential area. Such a risk is unacceptable for the population and requires the implementation of environmental protection measures. The risk of the odor threshold that occurs with dihydrosulfide emissions from a burning waste dump is up to 1.7 in the sanitary protection zone and up

to 3.8 in a residential area. Exceeding the dihydrosulfide odor threshold will affect the socio-economic potential of the residential area. Assessment of the environmental risk during the exploitation of subsoil waste using qualitative and quantitative methods allows us to identify the causes of environmental pollution, assess the consequences of pollution and develop environmental protection measures taking into account the priority of impact.

**Keywords:** environmental risk, subsoil waste, dihydrosulfide, odor threshold, emissions, non-carcinogenic risk, waste dump, spontaneous combustion, fault tree, risk matrix.

*Для цитирования: Козырь Д.А. Оценка экологического риска при обращении с отходами недропользования / Д.А. Козырь // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 4(68). – С. 244-251. – EDN: JDJSJK.*

**Введение.** В соответствии с программой развития угольной промышленности, утверждённой правительством России до 2035 года, предполагается увеличение добычи угля от 485 до 668 миллионов тонн и экспорта от 259 до 392 миллионов тонн [1]. Ключевым фактором развития экономики является добыча полезных ископаемых, но также она приводит к загрязнению окружающей среды [2]. Защита окружающей среды неотделима от добычи полезных ископаемых. Чрезмерная эксплуатация природных ресурсов снижает способность окружающей среды к восстановлению, приводит к оседанию земной поверхности, деградации растительности, почв, загрязнению атмосферы и водных объектов [3].

Породные отвалы, образующиеся при добыче угля, представляют особую опасность для окружающей среды – они занимают большие площади и приводят к изменению её состояния. Породные отвалы склонны к самовозгоранию, при их горении в атмосферу выбрасываются пыль, токсичные и парниковые газы [4].

В настоящее время на территории Донецкой Народной Республики, Россия насчитывается более 600 породных отвалов, из которых около 140 горящих [5]. Расчеты рассеивания выбросов загрязняющих веществ от горящего породного отвала показывают превышение санитарных нормативов на границе санитарно-защитной зоны [6, 7]. Концентрации свинца в почве в зоне действия породных отвалов в Тульской области достигают 8 ПДК [8]. В результате самовозгорания породных отвалов могут возникнуть обвалы, оползни и взрывы, что может поставить под угрозу жизнь населения горнопромышленных агломераций и причинить серьезный ущерб окружающей среде [9]. При самовозгорании породных отвалов, входящие в их состав дисперсные частицы алюминия и магния могут привести к распространению пожара [10].

Для повышения уровня экологической безопасности отходов недропользования необходим своевременный мониторинг их теплового состояния, который позволит предотвращать самовозгорание породных отвалов. Для анализа теплового состояния отходов горной промышленности в дополнение к существующим контактным и дистанционным методам контроля, разработана математическая модель теплового состояния породного отвала на основе метода термодинамики необратимых процессов [11]. После предотвращения самовозгорания породные отвалы могут использоваться как техногенные месторождения. Утилизация отходов недропользования позволит комплексно использовать природные ресурсы, получать новые виды продукции и реализовывать цели устойчивого развития [12].

При разработке природоохранных мероприятий, направленных на повышение уровня экологической безопасности горнопромышленных агломераций, необходимо выполнить оценку экологических рисков, возникающих при обращении с породными отвалами. Оценка экологических рисков позволит комплексно оценить влияние породных отвалов на окружающую среду, выявить приоритетные факторы негативного воздействия и разработать природоохранные мероприятия по снижению риска. Оценка экологических рисков в настоящее время применяется для оценки воздействия на окружающую среду и для установления санитарно-защитной зоны (СЗЗ).

Подход оценки эколого-экономического риска ущерба окружающей среде применен на отвалах вскрышных пород горнодобывающей промышленности г. Новороссийска. Опасность хранилищ отходов горнодобывающей промышленности оценена количественно с выделением факторов угрозы и расчётом наносимого ущерба. На основании рассчитанного риска обоснована необходимость рекультивации отвалов [13].

Оценка риска рассеивания твердых частиц и загрязнения микроэлементами при складировании отходов добычи была выполнена на породном отвале шахты на юго-западе Испании, при этом использовались рассеивание твердых частиц, расчет индекса нагрузки загрязнения и географическая информационная система [14]. Районы добычи полезных ископаемых в Южной Корее были проанализированы с учетом просадки грунта, деградации растительности, влияния отвалов пустой породы и шахтных вод на окружающую среду. Выявлены заброшенные шахты, представляющие наибольший экологический риск [15].

Исследователями рассмотрены экологические риски на закрытых горных предприятиях Дальневосточного федерального округа (ДФО). Установлена высокая токсичность отходов закрытых горных предприятий Солнечный ГОК и Хрустальненский ГОК которая, способствует интенсивному

загрязнению окружающей среды и повышению заболеваемости населения горняцких поселков в ДФО [16].

Воздействие горнодобывающей деятельности на поверхностные водоемы в Андском регионе Перу было исследовано с применением оценки экологического риска. Выполненные исследования показали значительные концентрации тяжелых металлов (*Fe* и *Cu*) на различных трофических уровнях и высокий уровень экологического риска в водоемах [17].

Для оценки влияния нарушений ландшафта на экологический риск исследователями количественно оценивались потери ландшафта, сведения о почвах, индекс экологических показателей оценки рисков и биоразнообразие [18]. При анализе загрязнения окружающей среды в районе добычи полезных ископаемых в Китае был рассчитан индекс экологических показателей оценки рисков и индекс экологической среды для горного предприятия [19]. Исследователями изучен горящий породный отвал шахты Сан-Педру-да-Кова (Порту, Португалия) и прилегающие территории с использованием данных мониторинга температуры отвала, альтиметрического анализа, анализа растительного покрова, гидрогеохимической характеристики почв, грунтовых и поверхностных вод. Информация была интегрирована в географическую информационную систему [20].

Оценка экологического риска качественными и количественными методами в соответствии с действующими нормативными и правовыми актами и результатами экспериментальных исследований позволят комплексно оценить воздействие породных отвалов на окружающую среду и выбрать приоритетные источники воздействия для дальнейших природоохранных мероприятий.

**Методология.** Объектом исследования является породный отвал шахты им. М.И. Калинина. Породный отвал горящий, временно не действующий. Площадь основания составляет 228000 м², высота – 69 м, количество накопленных отходов – 15 480 000 тонн, объем породы – 8 600 000 м³, форма породного отвала – усеченный конус. Шахта сдана в эксплуатацию в 1961 году с проектной мощностью 1200 тыс. тонн угля в год. Породный отвал находится в центральном районе г. Донецка, Донецкая Народная Республика, Россия. В пределах санитарно-защитной зоны (СЗЗ) расположена селитебная территория. Целью исследования является разработка методологии оценки экологического риска при обращении с породными отвалами.

Оценка выбросов взвешенных веществ горящего породного отвала выполнена в соответствии с действующей отраслевой методикой [21].

Данные о газовых выбросах горящего породного отвала были получены при экспериментальных исследованиях на отвале шахты им. М.И. Калинина (рис. 1).




*Рисунок 1 – Генплан породного отвала шахты им. М.И. Калинина*

Очаги тепловыделения определялись с применением тепловизионной камеры Fluke Ti-125. На выявленных очагах выполнялось измерение газового состава выбросов. Для снижения влияния атмосферных явлений на результаты исследований использовалась измерительная труба, диметром 0,2 м и высотой 1,5 м. Исследования проводились с использованием индикаторных трубок и газоанализаторов Testo-350XL, ОКСИ-5М, позволяющих проводить измерения концентраций оксидов азота, углерода, диоксида серы, содержания кислорода и температуры выбросов. Измерение

скорости проводилось путем пересчета измеренного динамического и статического давления [7]. При расчете выбросов загрязняющих веществ учитывалась площадь очагов тепловыделения. Анализ газовых выбросов был выполнен на 26 очагах тепловыделения на поверхности породного отвала.

Оценка экологического риска выполнялась в соответствии с ГОСТ Р 51901.22-2012 «Менеджмент риска. Реестр риска. Правила построения», ГОСТ Р 58771-2019 «Менеджмент риска. Технологии оценки риска» [22, 23]. Характеристика риска для здоровья населения выполнена в соответствии с Р 2.1.10.3968-23 «Руководство по оценке риска здоровью населения при воздействии химических веществ, загрязняющих среду обитания» [24].

**Результаты.** В соответствии с ГОСТ Р 51901.22-2012 «Менеджмент риска. Реестр риска. Правила построения» был разработан реестр рисков отходов недропользования. Реестр рисков содержит оценку 49 рисков, которые возможны при эксплуатации породного отвала шахты им. М.И. Калинина. Анализировались следующие группы рисков: природные и исходящие от территории риски; социальные и биологические риски; техногенные риски; информационные и террористические риски; профессиональные риски; правовые риски; климатические риски и адаптация; репутационные риски; экономические риски. Реестр рисков содержит наименование группы типов риска, наименование опасного события, описание опасного события, вероятность опасного события ($P$), последствия опасного события ($W$) и характеристику риска ($R$).

Для оценки вероятности опасного события и его последствий применялись оценки в баллах. Оценка вероятности опасного события выполнялась следующим образом:

– 100% – вероятность очень высокая, 5 баллов;
– 80% – вероятность высокая, 4 балла;
– 60% – вероятность средняя, 3 балла;
– менее 20% – вероятность низкая, 2 балла;
– менее 1% – вероятность очень низкая, 1 балл.

При оценке последствий опасного события применялась шкала:

– критические последствия, 5 баллов;
– значительные последствия, 4 балла;
– существенные последствия, 3 балла;
– малосущественные последствия; 2 балла;
– несущественные последствия, 1 балл.

Количественная характеристика риска определяется по формуле:

$R = W \cdot P$,

где $R$ – риск опасного события;

$P$ – вероятность опасного события;

$W$ – последствия опасного события.

Фрагмент реестра рисков, с событиями, имеющими наибольший риск представлен в таблице 1.

*Таблица 1 – Фрагмент реестра рисков с высокой вероятностью реализации и ущерба*

| № риска | Группа типов риска / Наименование опасного события | Описание опасного события (риска) | P, баллы | W, баллы | R |
|---|---|---|---|---|---|
| 7 | Социальные и биологические риски / пространственное размещение по отношению к селитебной территории; действие негативных факторов в случае опасных техногенных явлений с учетом распределения направления ветра, объемом суточных (годовых) выбросов и сбросов загрязняющих веществ | Породный отвал расположен в пределах горно-промышленной агломерации. В пределах СЗЗ находится селитебная территория. Существует риск загрязнения атмосферы, поверхностных водоемов, почв взвешенными веществами с содержанием тяжёлых металлов и выбросами газов. | 5 | 5 | 25 |
| 12 | Социальные и биологические риски / соблюдение законодательных требований и правовых норм, выполнение санитарно-гигиенических правил | На шахте им. М.И. Калинина проводится экологический мониторинг. Существует риск нарушения законодательства, т.к. породный отвал горящий и в пределах СЗЗ находится селитебная территория. | 5 | 4 | 20 |
| 15 | Техногенные риски / промышленные опасности | Риск выброса загрязняющих веществ | 5 | 4 | 20 |
| 16 | Техногенные риски / пожарная опасность и взрывоопасность | Риск горения породного отвала | 5 | 5 | 25 |
| 22 | Техногенные риски / негативное воздействие на экосистемы | Риск выброса токсичных газов, взвешенных веществ и тяжелых металлов | 5 | 4 | 20 |
| 23 | Техногенные риски / негативное воздействие на экосистемы | Риск загрязнения поверхностных водоёмов и почв | 5 | 4 | 20 |

События, которые приведут к существенным и значительным последствиям, а также характеризуются высокой и очень высокой вероятностью составляют 20% от общего числа проанализированных событий.

События, которые приведут к малосущественным и существенным последствиям характеризуются очень низкой и низкой вероятностью составляют 49% от общего числа проанализированных событий.

Полученные результаты оценки рисков породного отвала шахты им. М.И. Калинина представлены в виде матрицы рисков (рис. 2).

К событиям, риск которых максимальный из числа проанализированных в реестре и матрице риска относятся:

– риск выброса загрязняющих веществ;
– риск горения породного отвала;
– риск загрязнения поверхностных водоёмов и почв;

– риск водной и ветровой эрозии с поверхности породных отвалов;

– накопление отходов на значительной площади городских или сельскохозяйственных земель.

Таким образом с высокой вероятностью эксплуатация породных отвалов может привести к негативному воздействию на окружающую среду.

Проанализируем факторы, которые приводят к загрязнению окружающей среды породными отвалами с применением анализа дерева отказов (FTA) в соответствии с ГОСТ Р 58771-2019 «Менеджмент риска. Технологии оценки риска». Построение дерева отказов является эффективной процедурой выявления причин различных нежелательных событий. Анализ дерева отказов показал, что основную угрозу окружающей среде представляют процессы горения и пыления породных отвалов (рис. 3).

| Вероятность | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Очень высокая | | | 25, 27 | 12, 15, 22, 23 | 7, 16 |
| | Высокая | | 42, 47 | 1, 26, 18 | 7, 10, 29, 37, 48 | |
| | Средняя | | 44 | 8, 38, 20, 9 | 2, 32, 3, 4, 19, 20 | |
| | Низкая | 13, 49 | 6, 35, 45, 46 | 40,41 | | 17, 39 |
| | Очень низкая | | 15, 32 | 11, 13, 18, 19, 26, 33, 40 | 34 | |
| | | несущественные | малосущественные | существенные | значительные | критические |
| | Последствия/Ущерб | | | | | |

*Рисунок 2 – Матрица рисков при обращении с породным отвалом шахты им. М.И. Калинина (1 – 49 – опасные события в соответствии с реестром риска)*

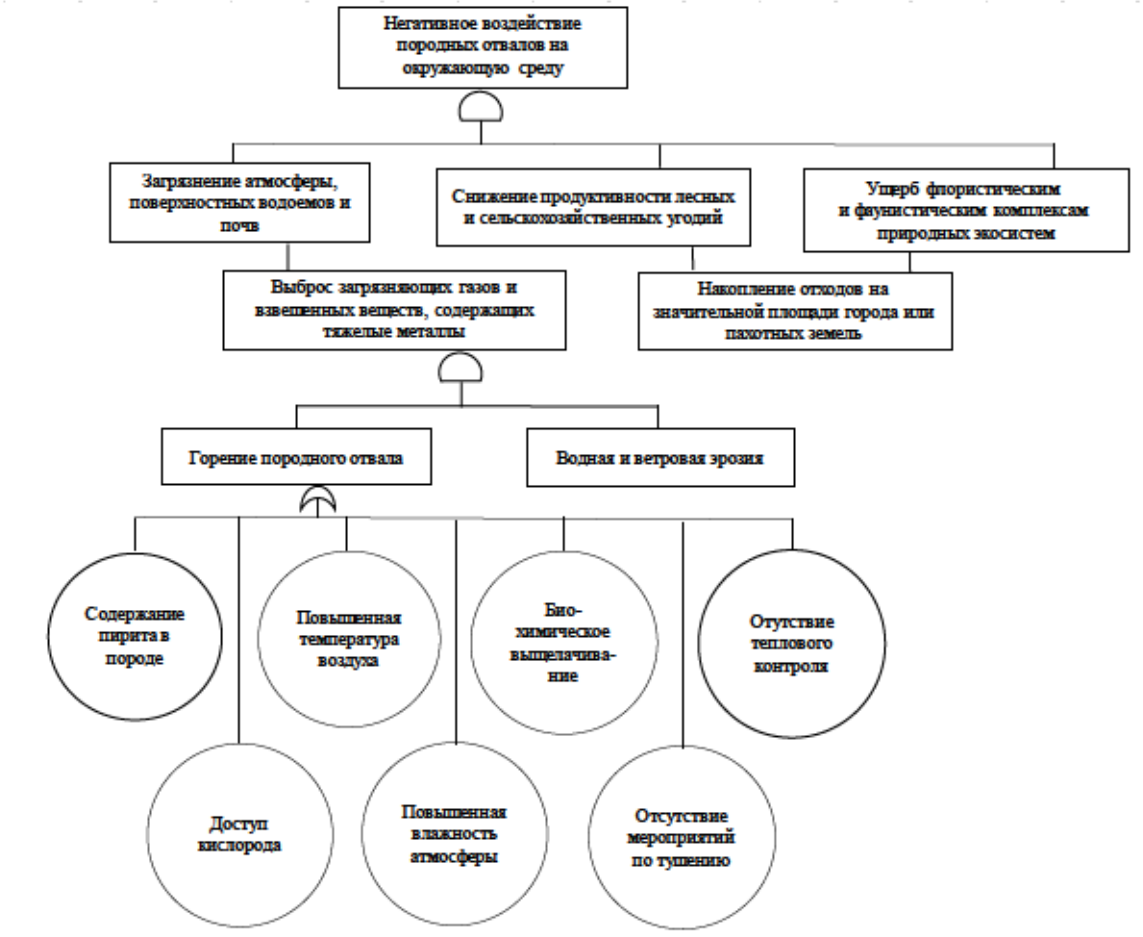



*Рисунок 3 – Анализ факторов, приводящих к загрязнению окружающей среды породными отвалами с применением дерева отказов (FTA)*

Процесс самоокисления углепородного массива зависит от ряда внешних и внутренних факторов, среди которых наибольшее значение, имеют такие факторы, как сернистость и влажность исходного материала, условия их образования, температура окружающей среды, способ добычи, размер и форма отвалов, газовая среда и т.д.

Для получения количественных показателей экологического риска при эксплуатации породного отвала шахты имени М.И. Калинина выполнена оценка воздействия на атмосферный воздух при его горении.

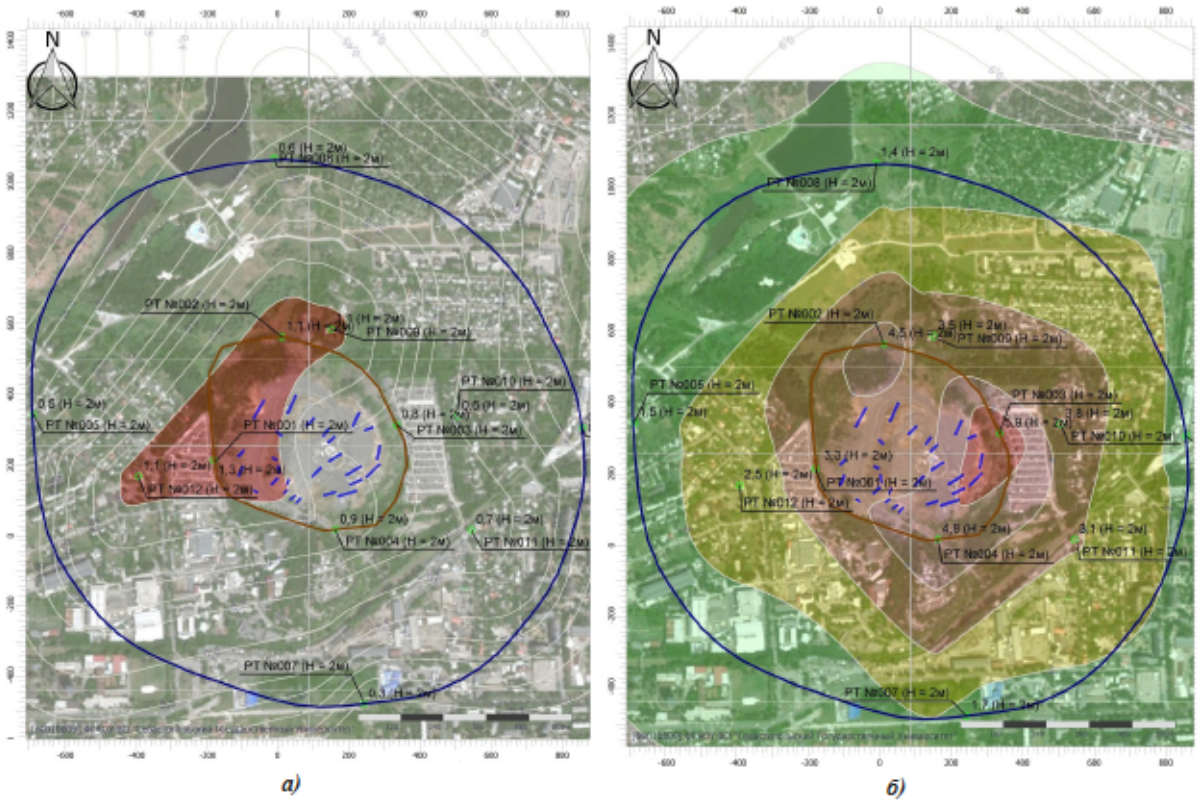
При идентификации опасности выполнено ранжирование выбрасываемых веществ по степени их опасности для человека. Ранжирование выполнялось по индексу сравнительной неканцерогенной опасности (*HRI*) и доле в суммарном выбросе загрязняющих веществ (*B* – ранг по доле выброса) (табл. 2).

Экологический риск развития неканцерогенных эффектов выбросов загрязняющих веществ при горении породного отвала рассчитан с применением методики Р 2.1.10.3968-23 «Руководство по оценке риска здоровью населения при воздействии химических веществ, загрязняющих среду обитания».

Расчет экологического риска при горении породного отвала шахты имени М.И. Калинина выполнен в программе УПРЗА «Эколог» (модуль «Риски»). Для анализа экологического риска были выбраны точки на границе породного отвала, на границе ориентировочной СЗЗ и на селитебной территории. Результаты расчета неканцерогенного риска (доли референтной концентрации при хроническом воздействии) приведены в таблице 3 и на рисунке 4.

*Таблица 2 – Перечень приоритетных химических веществ, подлежащих последующей характеристике*

| Вещество | Обоснование | Неканцерогенное действие |
|---|---|---|
| Дигидросульфид | Высокий приоритет по HRI, B3 | 1 |
| Сера диоксид | Высокий приоритет по HRI, B2 | 2 |
| Азота диоксид | Высокий приоритет по HRI, B4 | 3 |
| Углерода оксид | Высокий приоритет по HRI, B1 | 4 |
| Взвешенные вещества | Высокий приоритет по HRI, B5 | 5 |




*а)* *б)*

*Рисунок 4 – Результаты расчета доли референтной концентрации при хроническом воздействии выбросов дигидросульфида горящего породного отвала шахты им. М.И. Калинина(а), риск порога запаха дигидросульфида (б), М 1:10000*

*Таблица 3 – Расчет доли референтной концентрации при хроническом воздействии*

| № точки | Характеристика точки анализа | Значение риска | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Азота диоксид | Сера диоксид | Дигидро-сульфид | Углерода оксид | Взвешенные вещества |
| 1 | Промышленная зона | 0,02 | 0,17 | 1,33 | 0,01 | 0,00 |
| 2 | | 0,02 | 0,14 | 1,12 | 0,01 | 0,01 |
| 3 | | 0,01 | 0,12 | 0,76 | 0,01 | 0,00 |
| 4 | | 0,02 | 0,15 | 0,85 | 0,00 | 0,00 |
| 5 | Санитарно-защитная зона | 0,01 | 0,07 | 0,50 | 0,00 | 0,00 |
| 6 | | 0,01 | 0,07 | 0,41 | 0,00 | 0,00 |
| 7 | | 0,01 | 0,05 | 0,28 | 0,00 | 0,00 |
| 8 | | 0,01 | 0,10 | 0,65 | 0,01 | 0,00 |
| 9 | Селитебная территория | 0,02 | 0,18 | **1,10** | 0,01 | 0,01 |
| 10 | | 0,01 | 0,09 | 0,59 | 0,00 | 0,00 |
| 11 | | 0,01 | 0,12 | 0,69 | 0,01 | 0,00 |
| 12 | | 0,02 | 0,15 | **1,10** | 0,01 | 0,00 |

**Обсуждение.** Расчет доли референтной концентрации при хроническом воздействии показал, что значение риска на границе породного отвала, СЗЗ и селитебной территории по веществам азота диоксид, углерода оксид и взвешенные вещества минимальное. При выбросах диоксида серы уровень риска – допустимый.

При выбросах дигидросульфида на селитебной территории наблюдается настораживающий уровень риска. Такой риск является недопустимым для населения и требует выполнения природоохранных мероприятий.

При оценке качества жизни (оценка эмоционального, социально-экономического состояния и др.) и влияния на окружающую среду в качестве дополнительного критерия может использоваться риск ощущения запаха вещества. Доля порога запаха – это самая низкая концентрация определенного пахучего соединения, которая воспринимается обонянием человека. Порог химического соединения частично определяется его формой, полярностью, частичными зарядами и молекулярной массой.

Расчет риска порога запаха, который возникает при выбросах дигидросульфида на горящем породном отвале, составляет до 1,7 на СЗЗ и до 3,8 на селитебной территории в пределах СЗЗ.

Таким образом на селитебной территории, расположенной в пределах СЗЗ, существует настораживающий уровень риска хронического воздействии дигидросульфида и высокий риск ощущения его запаха. Порог запаха дигидросульфида превышен на границе СЗЗ и за её пределами, что оказывает влияние на эмоциональное состояние населения и социально-экономический потенциал селитебной территории.

**Выводы.** Оценка экологического риска при эксплуатации отходов недропользования качественными и количественными методами позволяет выявить причины возникновения загрязнения окружающей среды, оценить последствия загрязнения для того, чтобы в дальнейшем разработать природоохранные мероприятия с учетом приоритетности воздействия.

Оценка экологического риска с применением реестра рисков, матрицы рисков и анализа дерева отказов (*FTA*) позволила выявить основные опасности, возникающие при эксплуатации породного отвала шахты имени М.И. Калинина. События, которые приведут к существенным и значительным последствиям и характеризуются высокой и очень высокой вероятностью составляют 20% от общего числа проанализированных событий. Основную угрозу окружающей среде представляют процессы горения породных отвалов, выбросы взвешенных веществ и токсичных газов.

Расчет доли референтной концентрации при хроническом воздействии показал, что при выбросах дигидросульфида на селитебной территории наблюдается настораживающий уровень риска. Такой риск является недопустимым для населения и требует выполнения природоохранных мероприятий.

Расчет риска порога запаха, который возникает при выбросах дигидросульфида на горящем породном отвале, составляет до 1,7 на СЗЗ и до 3,8 на селитебной территории. Превышение порога запаха дигидросульфида будет оказывать влияние на эмоциональное состояние населения и социально-экономический потенциал селитебной территории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Об утверждении Программы развития угольной промышленности России на период до 2035 года (с изменениями на 13 октября 2022 года): распоряжение Правительства РФ 1582-р от 13.06.2020 // Официальный интернет-портал правовой информации www.pravo.gov.ru, 18.06.2020, ст. 0001202006180009.

2. Zhu Xiaojun, Li Junxiu, Cheng Hua, Zheng Liugen, Huang Wenshan, Yan Yu, Liu Hui, Yang Xiaoyu. Assessing the impacts of ecological governance on carbon storage in an urban coal mining subsidence area // Ecological Informatics. – 2022. – Vol. 72. – P. 101901. – DOI 10.1016/j.ecoinf.2022.101901.

3. Søndergaard J., Mosbech A. Mining pollution in Greenland – the lesson learned: A review of 50 years of environmental studies and monitoring // Science of The Total Environment. – 2022. – Vol. 812. – P. 152373. – DOI 10.1016/j.scitotenv.2021.152373.

4. Azadi M., Northey S., Ali S., Edraki M. Transparency on greenhouse gas emissions from mining to enable climate change mitigation // Nature Geoscience. – 2020. – Vol. 13. – P. 100-104. – DOI 10.1038/s41561-020-0531-3

5. Шаповалов В.В., Козырь Д.А. Ресурсосберегающая технология утилизации породных отвалов горнодобывающих производств // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 4. – С. 175-184. – DOI 10.18799/24131830/2023/4/3965.

6. Высоцкий С.П., Козырь Д.А. Экологический мониторинг породных отвалов горнопромышленных агломераций // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 11. – С. 37–46. – DOI 10.18799/24131830/2021/11/2964.

7. May I.V., Kleyn S.V., Vekovshinina S.A. Assessment of impact of accumulated environmental damage to the quality of soil, surface and groundwater, agricultural products resulted from the mining enterprise // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Krasnoyarsk, 20-22 июня 2019 года / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk: Institute of Physics and IOP Publishing Limited. – 2019. – Vol. 315. – P. 62024. – DOI 10.1088/1755-1315/315/6/062024.

8. Качурин Н.М., Левкин Н.Д., Калаева С.З., Чистяков Я.В. Породные отвалы ликвидированных шахт подмосковного бассейна как источник выбросов пыли в атмосферу // Экология и промышленность России. – 2016. – Т. 20, № 5. – С. 47-51. – DOI 10.18412/1816-0395-2016-5-47-51. – EDN VXBTKP.

9. Wang H.Y., Tan B., Zhang X.D. Research on the technology of detection and risk assessment of fire areas in gangue hills// Environmental Science and Pollution Research. – 2020. – Vol. 27. – P. 38776-38787. –DOI: 10.1007/s11356-020-09847-1.

10. Козырь Д.А. Оценка воспламеняемости дисперсных компонентов отходов горнодобывающей промышленности // Безопасность труда в промышленности. – 2023. – № 2. – С. 42-47. – DOI 10.24000/0409-2961-2023-2-42-47. – EDN ZESXDI.

11. Козырь Д.А. Математическая модель теплового состояния техногенных отходов горнодобывающей промышленности // Безопасность труда в промышленности. – 2024. – № 7. – С. 16-20. – DOI 10.24000/0409-2961-2024-7-16-20. – EDN ZWICJQ.

12. Ефименко А.А., Орлов А.А., Макеева Д.А., Козырь Д.А., Волкова В.А. Экологическая безопасность и энергетическая независимость Донбасса // Уголь. – 2021. – № 6. – С. 58–61. – DOI 10.18796/0041-5790-2021-6-58-61.

13. Пашкевич М.А., Алексеенко А.В., Петрова Т.А. Оценка и контроль эколого-экономического риска в Новороссийской промышленной агломерации // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2018. – № 1. – С. 23-35. – EDN YTFWVR.

14. Romero Antonio, González Isabel, Martín José María, Vázquez María Auxiliadora, Ortiz Pilar. Risk assessment of particle dispersion and trace element contamination from mine-waste dumps. // Environmental Geochemistry and Health. – 2015. – Vol. 37. – P. 273-286. – DOI 10.1007/s10653-014-9645-0 1.

15. Sung-Min Kim, Jangwon Suh, Sungchan Oh, Jin Son, Chang-Uk Hyun, Hyeong-Dong Park, Seung-Han Shin, Yosoon Choi. Assessing and prioritizing environmental hazards associated with abandoned mines in Gangwondo, South Korea: the Total Mine Hazards Index. // Environmental Earth Sciences. – 2016. – Vol. 75. – P. 1-14. – DOI https://doi.org/10.1007/s12665-016-5283-4.

16. Крупская Л.Т., Орлов А.М., Голубев Д.А., Колобанов К.А., Филатова М.А. Оценка экологической опасности накопленных отходов переработки минерального сырья закрытых горных предприятий в Приамурье и Приморье. // Горные науки и технологии. – 2020. – № 5(3). – С. 208-223. – DOI 10.17073/2500-0632-2020-3-208-223.

17. Moreno Aguirre S., Vertiz J., Paredes-Espinal C., Meseth E., Vilchez-Ochoa G., Espino-Ciudad J., Flores del Pino de Wright L. Ecological risk of metals in Andean water resources: A framework for early environmental assessment of mining projects in Peru. // Heliyon. – 2024. – Vol. 10. P. e30739. – DOI 10.1016/j.heliyon. 2024.e30739.

18. Xiaoya Zhu, Peixian Li, Bing Wang, Sihai Zhao, Tao Zhang, Qingyue Yao. Construction of landscape eco-geological risk assessment framework in coal mining area using multi-source remote sensing data // Ecological Informatics. 2024. – Vol. 81 – P. 102635. – DOI https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102635.

19. Zhang P., Chen X., Ren Y., Lu S., Song D., Wang Y. A Novel Mine-Specific Eco-Environment Index (MSEEI) for Mine Ecological Environment Monitoring Using Landsat Imagery // Remote Sens. – 2023. – Vol. 15. – P. 933. – DOI https://doi.org/10.3390/rs15040933.

20. Teodoro A., Santos P., Espinha Marques J., Ribeiro J., Mansilha C., Melo A., Duarte L., Rodrigues de Almeida C., Flores D. An Integrated Multi-Approach to Environmental Monitoring of a Self-Burning Coal Waste Pile: The São Pedro da Cova Mine (Porto, Portugal) Study Case. // Environments. – 2021. – Vol. 8 – P. 48. – URL: https://doi.org/10.3390/environments8060048.

21. Отраслевая методика расчета количества отходящих, уловленных и выбрасываемых в атмосферу вредных веществ предприятиями по добыче угля / Минэнерго РФ. Департамент угольной промышленности; ОАО «МНИИЭКО ТЭК». – Пермь. – 2014. – 186 с.

22. ГОСТ Р 51901.22-2012. Менеджмент риска. Реестр риска. Правила построения: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2013-12-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – Изд. официальное. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 20 с.

23. ГОСТ Р 58771-2019 Менеджмент риска. Технологии оценки риска: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2020-03-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – Изд. официальное. – Москва: Стандартинформ, 2020. – 90 с.

24. Р 2.1.10.3968-23. 2.1.10. Состояние здоровья населения в связи с состоянием окружающей среды и условиями проживания населения. Руководство по оценке риска здоровью населения при воздействии химических веществ, загрязняющих среду обитания: Руководство: дата введения 2024-01-01 / Государственное санитарно-эпидемиологическое нормирование Российской Федерации. – Изд. официальное. – Москва: Стандартинформ, 2024. – 302 с.

*Статья поступила в редакцию 30.09.2024*
*Статья принята к публикации 13.12.2024*

УДК 69.331.438
EDN: JNZABX

# МЕТОД ОРГАНИЗАЦИИ СИСТЕМЫ СПАСЕНИЯ И ЭВАКУАЦИИ, ИНТЕГРИРОВАННОЙ СО СТРАХОВОЧНОЙ СИСТЕМОЙ ПРИ РАБОТЕ НА ОПОРЕ С ЛЕСТНИЦЫ

©Автор(ы) 2024

SPIN: 2462-6195
AuthorID: 790423
ORCID: 0000-0002-7502-386X
ResearcherID: Г-5723-2018
ScopusID: 57215931961

**СЕНЧЕНКО Владимир Александрович**, главный специалист по охране труда
*Волгоградский филиала ПАО «Ростелеком»*
*(400048, Россия, г. Волгоград, ул. Землячки, 18, E-mail: Vladimir.senchenko1973@gmail.com)*

SPIN: 9801-3490
AuthorID: 704170
ORCID: 0000-0002-7423-4892
ResearcherID: P-5020-2015
ScopusID: 6507592108

**КАВЕРЗНЕВА Татьяна Тимофеевна**, кандидат технических наук, доцент,
доцент Высшей школы Техносферной безопасности
*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*
*(Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; E-mail: kaverztt@mail.ru)*

SPIN: 5470-1533
AuthorID: 888327
ORCID: 0000-0002-4037-1231
ResearcherID: O-9318-2017
ScopusID: 56979008100

**РЫБАКОВ Анатолий Валерьевич,** доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры информационных систем и технологий
*Академия гражданской защиты МЧС России*
*(141435, Россия, Московская обл., г. о. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А,*
*e-mail: a.rybakov@agz.50.mchs.gov.ru)*

SPIN-код: 1353-8309
AuthorID: 970943
ORCID: 0000-0001-6319-5413
Scopus ID: 57210910552

**СКРИПНИК Игорь Леонидович**, кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры Пожарной безопасности технологических процессов и производств
*Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России*
*(196105, Россия, г. Санкт-Петербург, Московский проспект, д. 149, e-mail: ig.skripnick2011@yandex.ru)*

**Аннотация.** Проводные линии связи продолжают оставаться важным компонентом инфраструктуры связи, несмотря на развитие беспроводных технологий. Воздушные линии связи (далее ВЛС) требуют технического обслуживания и ремонта. Использование приставной лестницы для обслуживания ВЛС обеспечивает доступность, мобильность и относительно низкую стоимость, но сопряжено с риском падения с высоты. Развитие простой, мобильной, надежной и экономически доступной системы, объединяющей страховочные, спасательные и эвакуационные функции, приобретает особую актуальность для отрасли. Для решения данной проблемы разработан метод организации системы спасения и эвакуации, интегрированной со страховочной системой при работе на опоре с лестницей. В предлагаемом техническом решении используется страховочная привязь, анкерная линия, устройство ползункового типа, репшнур с узлами Грейпвайн и узлом Маршара. В статье приведены пошаговое описание данного метода, компонентный состав системы и нормативный документ, устанавливающий требования к компоненту. Обоснована надежность каждого компонента системы, а также метода в целом, приведено ограничение по использованию метода. В статье приведен опыт внедрения данного метода в Волгоградском филиале ПАО «Ростелеком».

**Ключевые слова:** работы на высоте, приставные лестницы, воздушные линии связи, система обеспечения безопасности работ на высоте, система спасения и эвакуации работников, спасательные работы.

# A METHOD OF ORGANIZING A RESCUE AND EVACUATION SYSTEM INTEGRATED WITH THE SAFETY SYSTEM WHEN WORKING ON A LADDER SUPPORT

© The Author(s) 2024

**SENCHENKO Vladimir Aleksandrovich**, chief specialist for Labour Protection
*Volgograd Branch of PJSC "Rostelecom"*
*(400048, Russia, Volgograd, Zemlyachki str. 18, e-mail: Vladimir.senchenko1973@gmail.com)*
**KAVERZNEVA Tatiana Timofeevna**, candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor Graduate School of Technosphere Safety
*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*
*(Russia, 195251, St. Petersburg, Polytechnicheskaya St., 29; e-mail: kaverztt@mail.ru).*
**RYBAKOV Anatoly Valeryevich**, doctor of technical sciences, professor,
professor of the Department of Information Systems and Technologies
*Academy of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of Russia*
*(141435, Russia, Moscow Region, Khimki, Moscow District, Novogorsk, Sokolovskaya str. 1A; e-mail: a.rybakov@agz.50.mchs.gov.ru).*
**SKRIPNIK Igor Leonidovich**, candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the Department of Fire Safety of Technological Processes and Product
*St. Petersburg State Fire Service University of the Ministry of Emergency Situations of Russia*
*(196105, Russia, St. Petersburg, Moskovskiy Prospekt, 149, e-mail: ig.skripnick2011@yandex.ru)*

**Abstract.** Wire lines continue to be an important component of the communications infrastructure despite the development of wireless technologies. Overhead lines (hereinafter referred to as overhead lines) require maintenance and repair. The use of an extension ladder to maintain overhead lines provides accessibility, mobility and relatively low cost, but carries the risk of falling from heights. The development of a simple, mobile, reliable and economically accessible system that integrates safety, rescue and evacuation functions is of particular relevance to the industry. To solve this problem, a method of organising a rescue and evacuation system integrated with a safety system when working on a ladder support has been developed. The proposed technical solution uses a safety harness, anchor line, a slider-type device, a lanyard with Grapevine knots and Marshar knot. The article provides a step-by-step description of this method, as well as the components of the system and the regulatory document that establishes the requirements for the component. The article justifies the reliability of each component of the system as well as the method as a whole. The article gives the limitation on the use of the method. The article presents the experience of implementing this method in the Volgograd branch of Rostelecom PJSC.

**Keywords:** work at height, extension ladders, overhead communication lines, safety system of work at height, system of rescue and evacuation of workers, rescue work.

*Для цитирования: Сенченко В.А. Метод организации системы спасения и эвакуации, интегрированной со страховочной системой при работе на опоре с лестницы / В.А. Сенченко, Т.Т. Каверзнева, А.В. Рыбаков, И.Л. Скрипник // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 4(68). – С. 252-259. – EDN: JNZABX.*

**Введение.** Проводные линии связи еще долгое время будут активно использоваться в России и во всем мире. Несмотря на то, что развитие технологий привело к широкому распространению беспроводных сетей связи, проводные линии связи продолжают играть важную роль в различных областях, так как имеют ряд преимуществ перед беспроводными технологиями.

Воздушные линии связи являются наиболее дешевым и эффективным способом прокладки линий связи благодаря своей низкой стоимости, простоте установки, возможности прокладки в труднодоступных местах и легкому доступу для обслуживания. Поэтому воздушные линии связи (далее ВЛС) остаются важным компонентом инфраструктуры связи и продолжают активно использоваться в современном мире.

Для подключения абонентов, технического обслуживания и ремонта ВЛС необходим подъем специалиста на опору. Подъем на опору ВЛС возможно осуществить при помощи автоподъемника с люлькой или при помощи средств подмащивания. Подъем на опору ВЛС с помощью приставной лестницы является одним из наиболее доступных способов проведения работ. Преимущества использования приставной лестницы включают в себя низкую стоимость аренды или приобретения, простоту использования и мобильность. Недостаток этого способа – это существенный риск падения с высоты. Использование подъемников существенно дороже и из-за ограниченной проходимости техники не всегда технически возможно ее использовать. Таким образом, повышение безопасности выполнения работ на опоре с использованием приставной лестницы является актуальной практической задачей при обслуживании ВЛС.

По всему миру падение с высоты, включая падение со ступеней лестницы, считается одной из основных причин получения травм, которые могут быть тяжелыми или даже смертельными [1-11]. Перед началом работ на высоте необходимо обеспечить разработку и реализацию технико-технологических и организационных мероприятий, включая план производства работ на высоте, а также план действий по эвакуации и спасению сотрудников в случае возникновения аварийных ситуаций и в процессе

проведения спасательных операций [12].

Указанные планы мероприятий должны включать в себя систему обеспечения безопасности работ на высоте, а также систему спасения и эвакуации сотрудников в случае возникновения аварийных ситуаций и во время проведения спасательных операций. Следовательно, при выполнении работ на опоре с использованием лестницы необходимо предусмотреть данные системы.

Существуют много способов организации страховки и систем эвакуации и спасения, но в экономическом и практическом плане они не всегда практичны и доступны для использования. Потому что, как правило, это две разные системы, которые собираются по отдельности, что требует дополнительного времени, дополнительной подготовки персонала и финансовых затрат.

Например, ООО «Вентопро» предлагает несколько средств спасения и эвакуации с высоты. Они все собираются после наступления аварийной ситуации. Спасатель должен подняться наверх к пострадавшему, смонтировать выше пострадавшего спасательный канат, зацепить его за спусковое устройство, отсоединить пострадавшего от страховочной системы и произвести спуск пострадавшего. Специфика установки спасательных устройств требует от работника дополнительно теоретической подготовки и практического опыта использования, что серьезно повышает риск получения отрицательного результата в аварийных ситуациях [13].

В группе компаний ПАО «Россети» разработана инструкция по спуску пострадавшего с опоры высоковольтной линии электропередач (ВЛЭ). Алгоритм спуска пострадавшего предусматривает следующие действия спасателя: поднятие на опору к пострадавшему, закрепление блока или веревки за ближайшие два крюка изоляторов или за траверсу опоры, расположенную над пострадавшим, а также выполнение одного-двух витков веревки вокруг крюка. Один конец веревки следует зафиксировать на страховочной системе пострадавшего, а другой конец сбросить на землю. Далее необходимо отсоединить пострадавшего от стропа позиционирования и когтей, после чего, перебирая веревку, осуществить спуск пострадавшего на землю [14]. Недостатки данного способа: необходимо время, чтобы спасатель смог подняться и смонтировать блок с веревкой на опоре; нужна физическая сила у спасателя, чтобы при спуске пострадавшего у спасателя не выскользнула веревка; спасатель не может регулировать скорость спуска пострадавшего; нужна практическая подготовка спасателя для организации эвакуационных работ.

Следовательно, в настоящее время актуальной практической задачей для отрасли является разработка простой в использовании, мобильной, надежной, интуитивно понятной и экономически эффективной системы, которая объединяла бы функции страховки, спасения и эвакуации в условиях аварийной ситуации. Данная система должна позволять спасателю минимизировать время на организацию процедуры эвакуации, обеспечивая возможность немедленного извлечения пострадавшего с опоры в случае чрезвычайной ситуации.

**Методология.** Целью исследования является организация своевременной эвакуации работников с опоры в случае происшествия чрезвычайной ситуации с работником на высоте, а также снижение риска падения работников при выполнении работ на опорах ВЛС и ВЛЭ.

Для достижения поставленной цели был описан и обоснован метод организации системы спасения и эвакуации, интегрированной со страховочной системой при работе на опоре с лестницы. Были рассмотрены и оценены компоненты системы. Обоснована надежность каждого компонента и соответственно системы в целом. Приведены данные по апробации метода в производственных условиях.

**Результаты.** На рисунках 1 и 2 показан порядок организации системы спасения и эвакуации, интегрированный со страховочной системой при работе на опоре с лестницы (далее система).

*Подготовительные работы:* при организации системы спасения и эвакуации, интегрированной со страховочной системой, необходимо обеспечить установку упора 3 на верхнем конце лестницы для предотвращения сдвига её верхней части. Лестница должна быть прислонена верхней частью к опоре. Анкерная линия 5 должна быть установлена, пропуская её под верхней ступенькой лестницы и оборачивая вокруг опоры. Один конец анкерной линии фиксируется через карабин 9 и анкерную петлю 12 за тетиву лестницы, тогда как другой конец крепится к тетиве лестницы посредством репшнура с узлом Маршара 7, карабина 10 и анкерной петли 11. Лестница должна быть установлена в рабочее положение с углом между опорой и лестницей в диапазоне 25-30°. Анкерная линия 5 должна быть натянута для исключения провисания. Лестница фиксируется к опоре на высоте 1,2-1,7 метра с использованием каната и соединительного элемента 4 для предотвращения смещения её нижней части. Рекомендуется применять узлы восьмёрку-проводник или австрийский проводник (срединный) в сочетании с автоматическим карабином. Средство защиты ползункового типа 6 должно быть присоединено к страховочной привязи работника, обеспечивая безопасное страхование на высоте во время подъема, выполнение работ на опоре и спуска с неё, а также в процессе эвакуации.

*Выполнение работ на высоте на опоре в зоне производства работ:* При подъеме по лестнице на необходимую высоту работник устанавливает строп для рабочего позиционирования 8. При установке стропа следует обернуть его вокруг опоры. Во время нахождения в зоне проведения работ нужно исключить провисание соединительной подсистемы и стропа для рабочего позиционирования.

*Спуск с опоры:* Перед началом спуска с опоры по лестнице необходимо проверить правильность установки и отсутствие провисания средства защиты ползункового типа. Строп для рабочего позиционирования следует отсоединить от опоры. Средство защиты ползункового типа должно быть присоединено к анкерной линии. При спуске с опоры работник должен избегать расположения средства защиты ползункового типа ниже плеча, что обеспечит нулевой фактор рывка в случае падения. После безопасного спуска работника с лестницы на землю необходимо отсоединить средство защиты ползункового типа от страховочной привязи, опустить лестницу и осуществить демонтаж анкерной линии от опоры и лестницы в обратной последовательности.

*Эвакуация с опоры:* Если при производстве работ на опоре работнику стало плохо, он завис в бессознательном положении, то проводятся спасательные и эвакуационные работы.

Спасатель поднимается на опору по установленной лестнице. При этом он страхуется при помощи устройства ползункового типа за установленную анкерную линию. Спасатель разрезает (отцепляет) строп для позиционирования у пострадавшего. Спускается вниз на землю и начинает пострадавшего опускать на землю: ослабляет одной рукой узел Маршара и веревка начинает проходить через узел, пострадавший опускается на землю. После спуска на землю пострадавшего ему оказывается первая доврачебная помощь.

Так как система эвакуации встроена в систему спасения, то эвакуация пострадавшего занимает не более 3-х минут.

*Ограничения способа:* Стоит отметить, что данный способ подойдет только в том случае, если на опоре нет совместного подвеса. При наличии на опоре совместного подвеса в виде других линий связи или линий электропередач необходимо использовать страховку, которая обходит совместный подвес.

В таблице 1 приведены компоненты системы.

Как видно из таблицы компонентного состава, все нагружаемые элементы страховочной и эвакуационной системы состоят из сертифицированных и стандартизированных компонентов.

*Петля из репшнура и узел Маршара:* поподробнее остановимся на элементе №7 рисунке 3: узел Маршара, сделанный из петли из репшнура диаметром 7 мм.

Репшнур предназначен для вязки схватывающих узлов на основных веревках диаметром 9-11 мм. Веревка вспомогательная Cord 7 Vento имеет следующие технические характеристики: диаметр: 7 мм; материал полиамид; масса 31,8 г/м; разрывная нагрузка 14 кН; прочность с узлами 9,8 кН. В нашем случае схватывающий узел, затягивающийся под нагрузкой – узел Маршара (п. 7), применяется на основной веревке (п. 5).

Репшнур связывается в петлю при помощи узла Грейпвайн (п.13). В соответствии с пунктом 8 таблицы 1 Правил №782н узел Маршара может быть использован в аварийной ситуации для эвакуации с рабочего места. В нашей системе он является элементом для спасения и эвакуации.

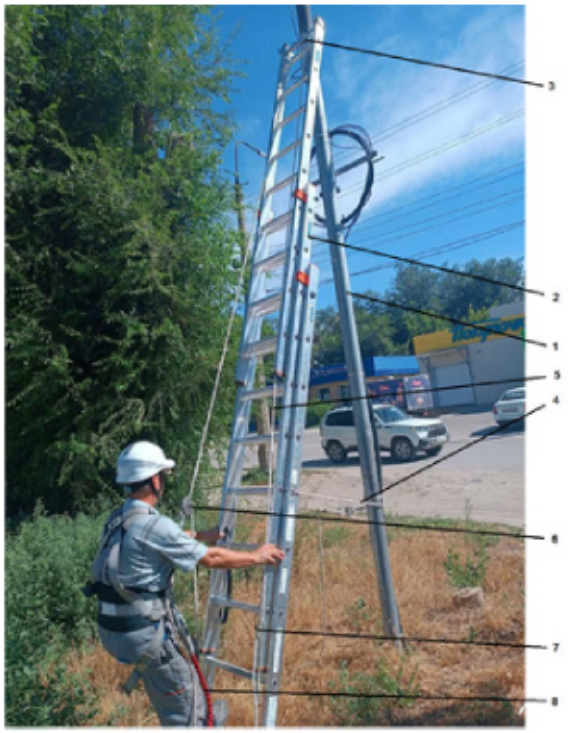



*Рисунок 1 – Общий вид системы спасения и эвакуации, интегрированный со страховочной системой при работе на опоре с лестницы*

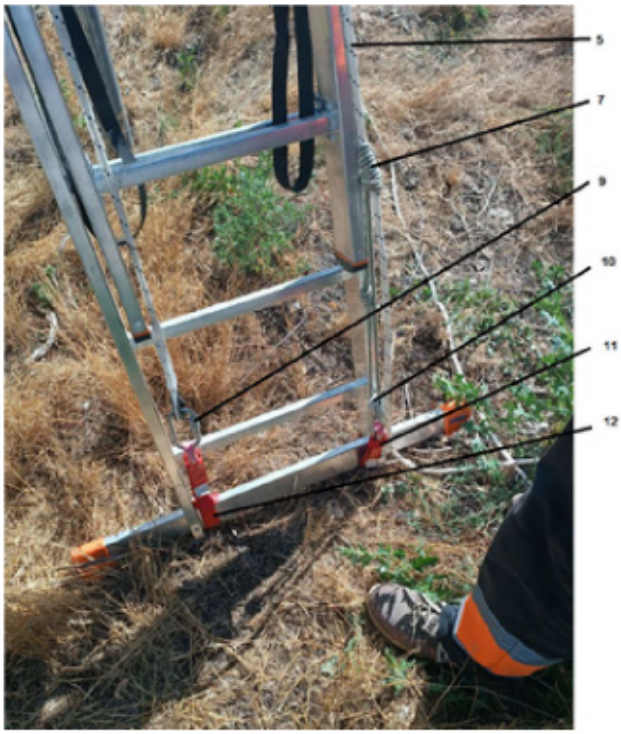



*Рисунок 2 – Нижняя часть системы спасения и эвакуации, интегрированный со страховочной системой при работе на опоре с лестницы*

*Таблица 1 – Компоненты системы и нормативный документ, устанавливающий требования к компоненту (Рис.1-2)*

| № | Наименование | Описание | Примечание, нормативный документ устанавливающий требования к устройству |
|---|---|---|---|
| 1 | Опора | Опора может быть металлической, деревянной, композитной или железобетонной | Опора металлическая, деревянная, композитная, железобетонная [15-20] |
| 2 | Лестница приставная | Лестница может быть любого производителя при достаточной высоте | ГОСТ Р 58752-2019 [21] |
| 3 | Упор для фиксации верхней части лестницы против сдвига | Упор для столбов KRAUSE 122452 | ГОСТ Р 58752-2019 [22] |
| 4 | Канат и соединительный элемент для фиксации лестницы к опоре (для предотвращения смещения нижней части лестницы) | Фиксация лестницы к опоре производится при помощи каната и соединительного элемента на уровне 1,2 – 1,7 м от земли. Рекомендуется использовать узлы восьмёрку-проводник и австрийский проводник (срединный), карабин автомат | В рабочем состоянии соединительный элемент не испытывает нагрузок |
| 5 | Гибкая анкерная линия с коушем на конце | Линия анкерная гибкая VENTO АнкерЛайн | ГОСТ Р ЕН 353-2-2007 [23] |
| 6 | Средство защиты ползункового типа ALPBLOCK | В случае срыва пользователя устройство автоматически блокируется. | ГОСТ Р ЕН 353-2-2007 [24] |
| 7 | Узел Маршара сделанный из петли из репшнура диаметром 7 мм | Репшнур предназначен для вязки схватывающих узлов на основных веревках диаметром 9–11 мм. | Пункт 8 таблицы 1 Правил [12] |
| 8 | Строп для позиционирования и удерживания | Регулируемый строп предназначен для работы в системе позиционирования и удержания. Оснащен специальным механизмом регулировки длины стропа | ГОСТ EN 358-2021 [25] |
| 9 | Карабин | Карабин овальный автомат алюминиевый AZ 012T<br>Класс: В, 25 кН | ГОСТ Р ЕН 362-2008 [26] |
| 10 | Карабин | | |
| 11 | Анкерная петля | Ленточная петля из полиамидной ленты для применения в качестве переносного (временного) анкерного устройства. Размер – 60 см | ГОСТ EN 795-2019 [27]<br>ГОСТ EN/TS 16415-2015 [28] |
| 12 | Анкерная петля | | |

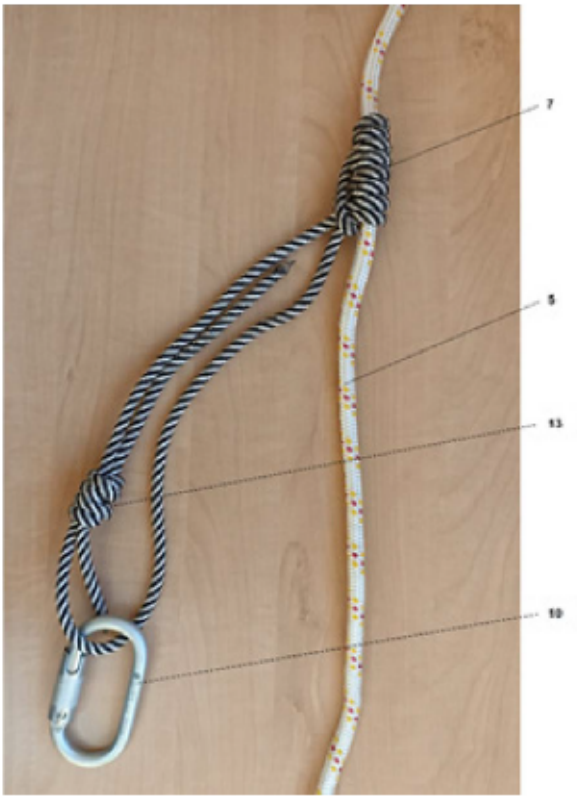



*Рисунок 3 – Репшнур с узлом Маршара (п. 7 – узел Маршара, п. 5 анкерная линия, п. 13 узел Грейпвайн, п. 13 – карабин)*

Проведенные испытания в лаборатории компании "Венто" петель, связанных из тестируемых вспомогательных веревок с использованием тарированного динамометра и гидравлической разрывной машины, продемонстрировали следующие результаты [29]:

1) Тестирование узла Грейпвайн. Тестирование петель, завязанных с помощью узла Грейпвайн (двойной ткацкий узел, двойной рыбацкий узел) вспомогательными веревками различных производителей диаметром 7 мм приведены в таблице 2.

Как мы видим, разрушающая нагрузка составила от 10,1 до 19,1 кН. Разрыв во всех случаях произошел в месте перегиба веревки через карабин. Узел Грейпвайн остался целым. Петля, завязанная с помощью узла Грейпвайн, обладает достаточной прочностью, превышающая прочность вспомогательной веревки. Прочность петли с узлом Грейпвайн соответствует результатам испытаний в других лабораториях. При испытаниях узел Грейпвайн сильно затягивался, и длина свободных концов, в процессе затягивания узла, уменьшалась на 30-33% с 35 мм до 18-20 мм. Затягивание узла происходит при нагрузках от 0,1 до 1 кН.

2) Тестирование схватывающего узла Маршара. Тесты схватывающего узла Маршара приведены в таблице 3. Для проведения испытаний узлы завязывались одним человеком и затягивались силой рук.

*Таблица 2 – Нагрузочные тесты петель, различных производителей, завязанных с помощью узла Грейпвайн*

| № | Название образца (производителя) | Разрушающая нагрузка, кН | Примечания |
|---|---|---|---|
| | ..... | | |
| 4 | Lanex 7 mm Б/у. | 10,1 | Разрыв по карабину |
| 5 | Beal 7 mm | 16,3 | Разрыв по карабину |
| 6 | Lanex 7 mm | 14,2 | Разрыв по карабину |
| 7 | Sterlingrope 7 mm | 19,1 | Разрыв по карабину |

*Таблица 3 – Нагрузочные тесты узла Маршара*

| № | Название узла | Тип веревки | Тип петли | Разрушающая нагрузка, кН | Примечания |
|---|---|---|---|---|---|
| | ..... | | | | |
| 12 | Маршара (клей-мхест) 6 оборотов | Канат 6 мм | Грейпвайн | 9,85 | Протравливание незначительное. Разрушение в узле Грейпвайн. |
| 13 | Маршара (клей-мхест) 6 оборотов | Канат 6 мм | Спивка | 10,2 | Протравливание незначительное. Разрушение в карабине. / Разрушение в схватывающем. |

Вышеуказанные испытания проведенные в лаборатории компании "Венто" показали следующее результаты:

– петля, сформированная с применением узла Грейпвайн, обладает достаточной прочностью, превышающая прочностью вспомогательной веревки. Результаты испытаний прочности петли с узлом Грейпвайн соответствуют данным, полученным в других лабораториях;

– узел Маршара способен выдерживать нагрузки, превышающие таковые у карабина или вспомогательной веревки, и обеспечивает минимальное проскальзывание, а также надежную фиксацию веревки.

Таким образом, прочность веревки вспомогательной Cord 7 Vento, заявленной производителем, можно принять в качестве прочности петли из используемыми нами узлами Грейпвайн и Маршара. Соответственно, мы берем прочность нашей петли завязанной узлом Грейпвайн вместе с узлом Маршара равной 9,8 кН.

**Обсуждение.** Так как устройство ползункового типа соединено через карабин напрямую с анкерной линией, то фактор рывка в любом случае будет равняться нулю. Поэтому нагрузка на страховочную систему в случае падения работника будет примерно равна его весу: таким образом, если мы возьмем вес человека равный 100 кг, то каждый элемент системы имеет примерно 10- кратный запас прочности.

Анкерное Устройство ТРАВЕРСА [30,31] может использоваться для организации точки анкерного крепления на любых горизонтальных элементах конструкции диаметром до 110 мм, в том числе на траверсе, тетиве лестницы. Данное устройство сертифицировано по ГОСТ EN 795-2019 (класс В). Обладает статической прочностью 22 кН. Применяется совместно с СИЗ ползункового типа на гибкой анкерной линии. Таким образом, траверса и тетива у лестницы может быть точкой для крепления анкерной точки. В нашем случае – это ленточная петля из полиамидной ленты, используемая в качестве переносного (временного) анкерного устройства (п.11 и 12 рис. 2).

Ядром системы эвакуации является узел Маршара. В данной системе используется его свойство ползти в одну сторону и схватываться при нагрузке. Поэтому, когда спасатель ослабляет одной рукой узел Маршара, то веревка начинает проходить через узел и пострадавший опускается на землю. Как только спасатель отпускает руку с узла Маршара, то он сразу схватывается под действием нагрузки.

Так как система эвакуации встроена в систему спасения, то эвакуация пострадавшего занимает не более 3 – х минут.

*Апробация метода*. В соответствии со статьей 214 Трудового кодекса Российской Федерации, работодатель несет ответственность за создание безопасных условий труда, основываясь на комплексной оценке как технического, так и организационного уровня рабочего места. Данные положения становятся основой для обеспечения безопасности труда при выполнении работ на опорах ВЛС.

Метод с нижней страховкой прошел апробацию в Волгоградском филиале ПАО «Ростелеком» в течение двух лет. С 2022 года он был утвержден в Плане производства работ на высоте и начал распространяться в техническом блоке филиала. Ежегодно данный метод использовали от 550 до 650 человек. Все работы на опоре ВЛС с применением приставной лестницы в Волгоградском филиале проводятся по данной технологии. Для того, чтобы внедрить данный метод, он демонстрировался на практической части обучения перед подготовкой к ежегодным экзаменам по охране труда у членов комиссии структурных подразделений Волгоградского филиала. Далее обученные чле-

ны комиссии его транслировали в своих подразделениях. На практике выявлялись элементы системы, которые наилучшим способом подходили к этому способу. Под эту технологию докупались средства индивидуальной защиты. С вовлечением все большего числа людей в данный процесс от работников поступала обратная связь и метод эволюционировал и совершенствовался.

Как работает система эвакуация и спасение, наглядно можно посмотреть на YouTube ролик "Эвакуация пострадавшего в случае ЧС при работе на опоре ВЛС" по ссылке https://youtu.be/oTdjUCUO-2Jo?si=Vee-NjSMLPx4lUYc.

**Выводы.** Работы на опорах ВЛС и ВЛЭ являются работами на высоте. Обеспечение безопасности этих работ, а также организация спасения и эвакуации работников в случае аварийных ситуаций, является не только юридической нормой, но и производственной необходимостью. Использование лестницы для работы на опорах представляет собой один из наиболее мобильных, простых и экономически целесообразных методов выполнения задач. Таким образом, актуальной задачей становится создание системы спасения и эвакуации пострадавших, интегрированной со страховочной системой, что существенно повысит защиту от чрезвычайных ситуаций и безопасность труда.

Существует множество подходов к организации страховочных систем и систем спасения и эвакуации, применяемых при выполнении работ на опорах с использованием лестниц. Однако, как правило, эти системы разрабатываются отдельно, что не только приводит к значительным экономическим затратам, но и требует много времени для реализации на практике.

Предложенная методика организации спасения и эвакуации пострадавших в сочетании со страховочной системой представляется наиболее доступной как с экономической, так и с практической точки зрения. Данный подход был успешно апробирован в Волгоградском филиале ПАО «Ростелеком». Хотя он не является универсальным техническим решением для полной безопасности при выполнении указанных работ, однако может быть включен в перечень различных технических решений, применяемых на опорах ВЛС и ВЛЭ с использованием лестниц, обеспечивая вариативность в сфере безопасности труда. Данное техническое решение может стать полезным при реализации работ на опорах ВЛС и ВЛЭ в сельской и сложнопроходимой местности, где использование подъемников невозможно или избыточно затратное.

***Благодарность.*** *Разработчиком и идейным вдохновителем предложенного метода является начальник отдела охраны труда Волгоградского филиала ПАО «Ростелеком» Глумов Е.А. Методологом и разработчиком выступил промышленный альпинист и инженер Центра эксплуатации филиала Белицкий Д.И. Постоянными экспериментаторами метода были специалисты отдела охраны труда филиала Сенченко В.А., Шаймарданов Д.А., Бобрышева И.В., Дулимов Ю.А., Митасов О.С., Сысоев А.Н. Реализация инициативы стала возможной благодаря поддержке руководства, включая директора филиала Пупинец С.Н., заместителя директора – технического директора Цабыбина В.Е. и бывшего технического директора, ныне директора департамента по техническому аудиту Корпоративного центра ПАО «Ростелеком» Волосевич К.В.*

**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.

5. Kissiková L., Dlugoš I. Comprehensive evaluation of the work at height / Kissiková L., Dlugoš I. // Acta Metallurgica Slovaca. – 2018. – Vol. 24, № 1. – P. 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. – P. 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., Hasmori 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. 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 25.07.2024).

13. Основные средства спасения и эвакуации с высоты: обзор и характеристики // VPRO URL: https://ventopro.ru/blog/osnovnye-sredstva-spaseniya-i-evakuacii-s-vysoty-obzor-i-kharakteristiki (дата обращения: 22.07.2024).

14. Инструкция по спуску пострадавшего с опоры воздушных линий электропередачи напряжением до 20 кВ

включительно утверждена Минэнерго СССР от 10.10.1979. URL: https:// https://docs.cntd.ru/document/1200035517 (дата обращения 25.07.2024).

15. Быковская Л.В. Сравнительный анализ опор линий электропередачи. / Быковская Л.В., Штрамель А.В. // Инновационная наука. – 2022.– №4-2. – С.44-46.

16. 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: JXKPEX.

17. 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.

18. 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.

19. Чушкина 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.

20. 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.

21. ГОСТ Р 58752-2019 Средства подмащивания. Общие технические условия. URL: https://docs.cntd.ru (дата обращения 25.08.2024).

22. ГОСТ Р 58752-2019 Средства подмащивания. Общие технические условия. URL: https://docs.cntd.ru (дата обращения 25.08.2024).

23. ГОСТ Р ЕН 353-2-2007 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства индивидуальной защиты от падения с высоты ползункового типа на гибкой анкерной линии. Часть 2. Общие технические требования. Методы испытаний. URL: https://docs.cntd.ru (дата обращения 25.08.2024).

24. ГОСТ Р ЕН 353-2-2007 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства индивидуальной защиты от падения с высоты ползункового типа на гибкой анкерной линии. Часть 2. Общие технические требования. Методы испытаний. URL: https://docs.cntd.ru (дата обращения 25.08.2024).

25. ГОСТ EN 358-2021 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства индивидуальной защиты от падения с высоты. Привязи и стропы для удержания и позиционирования. Общие технические требования. Методы испытаний. URL: https://docs.cntd.ru (дата обращения 25.08.2024).

26. ГОСТ Р ЕН 362-2008 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства индивидуальной защиты от падения с высоты. Соединительные элементы. Общие технические требования. Методы испытаний. URL: https://docs.cntd.ru (дата обращения 25.08.2024).

27. ГОСТ EN 795-2019 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства индивидуальной защиты от падения с высоты. Устройства анкерные. Общие технические требования. Методы испытаний (с Поправками).

28. ГОСТ EN/TS 16415-2015 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства индивидуальной защиты от падения с высоты. Анкерные устройства для использования более чем одним человеком одновременно. Общие технические требования. Методы испытаний. URL: https://docs.cntd.ru (дата обращения 25.08.2024).

29. Испытания различных вариантов схватывающих узлов // Школа MountSchool.ru URL: https://mountschool.ru/alpinizm/stati/84-ispytaniya-razlichnykh-variantov-skhvatyvayushchikh-uzlov-chast-1-i-chast-2 (дата обращения: 28.07.2024).

30. Инструкция по эксплуатации анкерное устройство типа В "ТРАВЕРСА" // VPRO Вентопро URL: https://ventopro.ru/catalog/ankernye-ustroystva/ankernoe-ustroystvo-traversa#product-doc-1 (дата обращения: 28.07.2024).

31. Кашевник, Б.Л. Аварийно-спасательное снаряжение для работ на высоте с использованием основ и приемов техники альпинизма: Учебно-методическое пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 032101 – Физическая культура и спорт / Б.Л. Кашевник, Ю.В. Байковский. – Москва: "Вертикаль", 2008. – 184 с. – EDN TWKYBD.

*Статья поступила в редакцию 01.10.2024*
*Статья принята к публикации 13.12.2024*

УДК: 614.8
EDN: VBTOHD

# ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА (*CHAT GPT*) ДЛЯ КАЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ РИСКА

© Авторы 2024

SPIN: 8180-9072
AuthorID: 535992
ORCID: 0000-0001-8572-4697
ResearcherID: R-1013-2017
ScopusID: 57205428646

**БЫЗОВ Антон Прокопьевич,** кандидат технических наук, доцент,
доцент Высшей школы техносферной безопасности инженерно-строительного института
*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*
*(195251, Россия, Санкт-Петербург, улица Политехническая, 29, e-mail: byzov_ap@spbstu.ru)*

SPIN: 9473-1733
AuthorID: 693078
ORCID: 0000-0003-0833-6863
ResearcherID: L 6450-2018
ScopusID: 57212259662

**КОЛЕСНИКОВ Евгений Юрьевич,** доктор технических наук, доцент,
профессор Высшей школы техносферной безопасности инженерно-строительного института
*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*
*(195251, Россия, Санкт-Петербург, улица Политехническая, 29, e-mail: byzov_ap@spbstu.ru)*

SPIN: 2591-9843
AuthorID: 133164
ORCID: 0000-0001-8297-9993
ResearcherID: F-1991-2010
ScopusID: 13405460000

**ЧЕРНЫШОВ Михаил Викторович,** доктор технических наук, доцент, профессор кафедры
«Плазмогазодинамика и теплотехника» (А9) факультета ракетно-космической техники
*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова*
*(190005, Россия, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская улица, 1, e-mail: chernyshov_mv@voenmehr u)*

**ЧИЧИРИНА Дарья Дмитриевна,** студент магистратуры Высшей школы техносферной безопасности
инженерно-строительного института
*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*
*(195251, Россия, Санкт-Петербург, улица Политехническая, 29, e-mail: chichirina.d @ed .spbstu.ru)*

**Аннотация**. В последние годы большое внимание уделяется использованию искусственного интеллекта в области обеспечения безопасности, поскольку он обладает свойствами, позволяющими формулировать суждения на основе обучения. Системы искусственного интеллекта способны выявлять и анализировать потенциальные опасности, прогнозировать возможные сценарии и предлагать соответствующие меры безопасности для снижения риска несчастных случаев. Это делает их перспективным инструментом для оценки и управления рисками на опасных производственных объектах. Данная работа посвящена разработке методики проведения качественной оценки риска аварий с помощью искусственного интеллекта, а также проверке данной методики путем проведения анализа опасностей и работоспособности с использованием искусственного интеллекта. Цель исследования – разработать методику проведения качественной оценки риска аварий с помощью искусственного интеллекта. В статье был проведен анализ основных методов качественной оценки риска аварий. На основе проведенного анализа был выявлен метод, для которого наиболее перспективно применение искусственного интеллекта *Chat GPT*. Также были выявлены способности нейросети *Chat GPT* при проведении выявленного в результате анализа метода качественной оценки опасностей. В результате исследования была разработана методика проведения качественной оценки риска аварий с помощью нейросети *Chat GPT*.

**Ключевые слова:** риск, метод, оценка, авария, анализ риска, качественная оценка, искусственный интеллект, нейросеть, *Chat GPT*, методы качественной оценки опасностей.

# APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE (*CHAT GPT*) FOR A QUALITATIVE RISK ASSESSMENT

© The Authors 2024

**BYZOV Anton Prokop'evich,** candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the Higher School of Technosphere Safety of the Civil Engineering Institute
*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

*(195251, Russia, St. Petersburg, street Polytechnicheskaya, 29, e-mail: byzov_ap@spbstu.ru)*
**KOLESNIKOV Evgeny Yuryevich,** doctor of technical sciences, associate professor,
professor of the Higher School of Technosphere Safety of the Civil Engineering Institute
*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*
*(195251, Russia, St. Petersburg, street Polytechnicheskaya, 29, e-mail: byzov_ap@spbstu.ru)*
**CHERNYSHOV Mikhail Viktorovich,** doctor of technical sciences, associate professor,
professor of the Department of Plasma Gas Dynamics and Thermal Engineering (A9) of the Faculty of Rocket and Space Engineering
*Baltic State Technical University "VOENMEKH" named after D.F. Ustinov*
*W(190005, Russia, Saint Petersburg, 1-ya Krasnoarmeyskaya Street, 1, e-mail: chernyshov_mv@voenmeh.ru)*
**CHICHIRINA Darya Dmitrievna,** graduate student of the Higher School of Technosphere Safety of the Civil Engineering Institute
*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*
*(195251, Russia, St. Petersburg, street Polytechnicheskaya, 29, e-mail: chichirina.dd@edu.spbstu.ru)*

**Abstract.** In recent years, much attention has been paid to the use of artificial intelligence in the field of security, since it has properties that allow you to formulate judgments based on learning. Artificial intelligence systems are able to identify and analyze potential hazards, predict possible scenarios, and propose appropriate safety measures to reduce the risk of accidents. This makes them a promising tool for risk assessment and management at hazardous production facilities. This work is devoted to the development of a methodology for conducting a qualitative assessment of the risk of accidents using artificial intelligence, as well as testing this technique by analyzing hazards and performance using artificial intelligence. The purpose of the study is to develop a methodology for conducting a qualitative assessment of the risk of accidents using artificial intelligence. The article analyzes the main methods of qualitative assessment of the risk of accidents. Based on the analysis, a method was identified for which the use of artificial intelligence *Chat GPT* is the most promising. The abilities of the *Chat GPT* neural network were also revealed when conducting the method of qualitative assessment of hazards identified as a result of the analysis. As a result of the study, a methodology for conducting a qualitative assessment of the risk of accidents using the *Chat GPT* neural network was developed.

**Keywords:** risk, method, assessment, accident, risk analysis, qualitative assessment, artificial intelligence, neural network, *Chat GPT*, methods of qualitative assessment of hazards.

***Для цитирования:*** *Бызов А.П. Применение искусственного интеллекта (Chat GPT) для качественной оценки риска / А.П. Бызов, Е.Ю. Колесников, М.В. Чернышов, Д.Д. Чичирина // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 4(68). – С. 260-269. – EDN: VBTOHD.*

**Введение.** Федеральный закон от 14.07.2022 N 276-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [1] внёс существенные изменения в статью 6 «Условия соответствия объекта защиты требованиям пожарной безопасности» [2] значительно расширив ранее существующие два условия соответствия объекта защиты требованиям пожарной безопасности. При этом появилась возможность использовать пути, альтернативные расчету пожарного риска с определением расчетных величин (индивидуального, социального пожарного риска), такие как: специальные технические условия, стандарты организации.

При этом, в соответствии с положениями Приказа Ростехнадзора от 03.11.2022 N 387 «Об утверждении Руководства по безопасности «Методические основы анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах» рекомендуется применять метод «Анализ опасности и работоспособности» (*HAZOP*) для опасных производственных объектов или его составных частей с высоким уровнем капитальных затрат и сложности, с применением новых технологий [3].

Таким образом, метод анализ риска «Анализ опасности и работоспособности» (*HAZOP*) может стать инструментом, который используется для обоснования условий выполнения требований пожарной безопасности альтернативными путями в случае его применения для обоснования требований пожарной безопасности для сложных и уникальных объектов.

*Chat GPT* – это большая генеративная языковая модель, разработанная компанией *OpenAI*. *OpenAI* является выдающейся организацией, специализирующейся на исследованиях и разработках в области искусственного интеллекта. OpenAI стремится к обеспечению доступности искусственного интеллекта для общественности, поэтому в конце 2022 года данная компания представила *Chat GPT* для широкой публики [4-6]. Получение доступа к мощному алгоритму генерации текста послужило причиной многих исследований, направленных на изучение возможностей модели *Chat GPT* в различных областях [7].

В данном исследовании рассматриваются возможности применения искусственного интеллекта для качественной оценки рисков аварий. Проведённый анализ существующих методов качественной оценки рисков позволил выявить как возможности,

так и ограничения использования искусственного интеллекта в этой области. На основе полученных результатов были сформулированы перспективы применения искусственных нейронных сетей для проведения качественной оценки рисков.

**Методология.** Цель исследования – разработка методики проведения качественной оценки риска аварий с помощью искусственного интеллекта, а именно путем применения нейросети *Chat GPT*.

Для достижения поставленной цели были применены следующие методы: анализ, классификация, формализация, эксперимент.

В рамках принятого при проведении процедуры *HAZOP* подхода организуются сессии обсуждения возможных отказов и их влияния на работоспособность системы. В качестве участников сессии выступают различные специалисты (проектировщики, эксплуатация, эксперты и т.д.) под руководством менеджера сессии, который формулирует управляющие слова и фиксирует результаты обсуждения. В рамках проведённых экспериментов в качестве группы специалистов выступает нейросеть *Chat GPT*, а менеджера оператор ПК, который формулирует запросы по аналогии с тем, как бы это происходило при реальном проведении сессии процедуры *HAZOP*.

Данный подход базируется на гипотезе о том, что нейросеть *Chat GPT* обучена на значительном объёме материалов сети Интернет и способна одновременно выступать в качестве всех перечисленных специалистов в одном лице.

Для подтверждения достоверности полученных результатов были проанализированы результаты применения метода «Анализ опасности и работоспособности» для участков магистрального трубопровода, проведенные в рамках разработки обоснований безопасности.

**Результаты.** Модель *Chat GPT*, основанная на базе архитектуры GPT-3.5, является одной из мощнейших передовых технологических разработок в области искусственного интеллекта. Эта модель предназначена для выполнения различных задач, связанных с обработкой естественного языка, и обладает способностью генерировать человекоподобные тексты, адаптированные к различным контекстам и потребностям пользователя. *Chat GPT* способен поддерживать диалоги с людьми, отвечать на вопросы, генерировать тексты на разные темы, а также выполнять множество других задач, которые требуют обработки и генерации текста.

Создание *Chat GPT* оказало влияние на проведение исследований, направленных на изучение применения данной модели в различных сферах человеческой деятельности, таких как:

– Образование. В статьях [8, 9] рассматриваются вопросы использования искусственного интеллекта в области высшего образования, проводится анализ эффективности применения модели *Chat GPT* в образовательном процессе, оцениваются перспективы внедрения технологий искусственного интеллекта в систему высшего образования.

– Медицина. Статьи [10, 11] рассматривает применение *Chat GPT* для автоматизации некоторых процессов в медицинской области: обобщение историй болезни, системы поддержки, различные административные функции и т.д.

– Экономика. Статьи [12-14] направлены на изучение способностей *Chat GPT* в области развития малого и среднего предпринимательства, оценку эффективности проведения финансового анализа с помощью *Chat GPT*, точность прогнозов прибыли (убытков) производства, составленных *Chat GPT*.

Так как в некоторых исследованиях [15, 16] авторы пришли к выводу, что *Chat GPT* является эффективным инструментом для проведения экспертного метода, в рамках данного исследования было рассмотрено применение *Chat GPT* для проведения анализа опасностей и работоспособности (*HAZOP*). Метод *HAZOP* – это такой метод качественной оценки рисков, который применяется для выявления и оценки возможных опасностей и рисков, связанных со сложными системами и процессами на опасных производственных объектах [17, 18].

Общая процедура проведения *HAZOP* включает в себя определение процесса и его элементов, выявление возможных отклонений, их причин, последствий и определение защитных мер и мер по снижению опасности [19, 20].

Для проведения *HAZOP* с использованием *Chat GPT* в качестве эксперта необходимо сформировать исходные данные об анализируемом объекте и внести их в диалоговое окно *Chat GPT*. Чтобы получить наиболее полные и точные ответы от *Chat GPT*, ему необходимо предоставить следующую информацию об объекте: описание климатических условий расположения опасного производственного объекта, описание опасного производственного объекта и условий его строительства и эксплуатации, общую характеристику технологических процессов, характеристики опасных веществ, обращающихся на данном объекте.

Так как *Chat GPT* обучался в большей степени на текстах на английском языке, для достижения наибольшей точности выдаваемых ответов на запросы в данном исследовании вся информация, предоставляемая чату, была переведена на английский язык.

Чтобы определить возможности искусственного интеллекта (нейросеть *Chat GPT*) в области проведения оценки риска аварий был применен такой метод, как анализ. В результате проведенного анализа было выявлено, что *Chat GPT* способен определить:

1. Показатель критичности. *Chat GPT* не способен производить сложные математические расчеты, которые требуются для определения числовых показателей риска аварии. Поэтому *Chat GPT* может представить оценку риска в виде словесных показателей, таких как:

– низкий уровень опасности;
– средний уровень опасности;
– высокий уровень опасности.

2. Потенциальные отклонения. Получив необходимые данные из сформированного запроса, *Chat GPT* способен выявить возможные:

– Отклонения (например, отклонение давления в технологических установках от допустимых пределов);

– Нарушения (например, неисправность автоматических систем управления технологическим процессом, что приводит к их неправильной работе);

– Отказы (например, отказ системы автоматической сигнализации при возникновении критической ситуации).

3. Возможные причины отклонений. Получив необходимые данные об объекте из сформированного в качестве контекста запроса, *Chat GPT* способен сформировать список потенциальных причин отклонений на описанном в запросе объекте. Также было установлено, что указанные при формировании запроса виды опасностей, возможные на описываемом объекте, увеличивают для данной модели точность определения причин отклонений.

4. Возможные последствия отклонений. Получив необходимые данные об объекте из сформированного в качестве контекста запроса, *Chat GPT* способен сформировать список последствий отклонений, возможных на описанном объекте. В результате анализа данной возможности было выявлено, что увеличить точность ответа нейросети *Chat GPT* можно, задав дополнительные параметры: виды опасностей и причины их возникновения.

5. Возможные меры защиты. Получив необходимые данные об объекте из сформированного в качестве контекста запроса, *Chat GPT* способен сформировать список защитных мер, возможных на описанном объекте. Чтобы получить от *Chat GPT* более точные меры защиты, необходимо на этапе формирования запроса для описываемого объекта указать: виды опасностей, причины их возникновения и возможные последствия.

6. Рекомендации по снижению уровня опасности. Проанализировав данные из сформированного запроса, *Chat GPT* дает оценку уровню безопасности на описываемом объекте и на основе этой оценки предлагает способы повышения безопасности.

Однако в использовании *Chat GPT* в качестве инструмента для проведения качественной оценки риска аварий есть несколько недостатков:

1. Точность генерируемых ответов. *Chat GPT* – мощная модель генерации текста, однако в процесс ее обучения не входили задачи оценки риска. В связи с этим существует вероятность искажения информации, которую представляет *Chat GPT*.

2. Поверхностное знание области. *Chat GPT* – это модель обработки текста, которая представляет ответы, опираясь на полученные в процессе обучения шаблоны. Поэтому у *Chat GPT* отсутствует глубокое понимание сферы оценки риска, что является фактором, снижающим точность ответов *Chat GPT* в данной области.

3. Ограниченность данных. В области оценки риска аварий основную роль играют нормативные требования, которые с течением времени могут обновляться. Для обучения *Chat GPT* были применены материалы, собранные до 2021 года. Это означает, что документы и требования, вышедшие после 2021 года, *Chat GPT* при генерации ответа не учитывает, а значит, его ответы могут быть неактуальными.

Определив перспективы применения *Chat GPT* для качественной оценки риска была разработана методика применения искусственного интеллекта *Chat GPT* для качественной оценки риска аварий.

Методика проведения качественной оценки риска аварий, представленная ниже, состоит из четырёх шагов, в каждом из которых прописано с какой целью и для решения какой задачи применяется *Chat GPT*.

Шаг 1: Сбор данных и предварительная обработка. Сначала необходимо собрать и предварительно обработать данные, связанные с рассматриваемым объектом. Эти данные будут использоваться для создания контекста модели *Chat GPT*. Примерами таких данных могут быть отчеты об авариях, данные о климатических условиях на месте расположения опасного производственного объекта, характеристики самого объект, его условий строительства и эксплуатации, а также общие данные о технологических процессах и характеристики опасных веществ, с которыми объект работает. Так как на данный момент *Chat GPT*-3.5 не способен распознавать изображения, данные должны быть представлены в понятной для модели форме, например, в виде обычного текста. Это означает, что такую информацию об объекте, как схема технологических процессов необходимо преобразовать в текст, иначе *Chat GPT* не сможет учесть данную информацию при анализе риска.

Шаг 2: Создание контекста для *Chat GPT*. Следующим шагом будет создание контекста для *Chat GPT* на собранных данных. Создание контекста для *Chat GPT* начинается с подачи входных данных в форме текста на естественном языке, после чего производится настройка чата на основе разницы между предполагаемыми и реальными ответами. Благодаря настройке модель может провести анализ своих ответов и учесть ошибки при формировании следующего ответа.

Нейросеть *Chat GPT* – это языковая модель, которая генерирует ответ на введенный запрос, и, следовательно, на один и тот же запрос могут быть получены отличающиеся друг от друга ответы. Для получения нескольких ответов на запрос, можно воспользоваться функцией «Повторение запроса», которая находится в диалоговом окне введенного запроса. Функция «Повторение запроса» позволяет получить новую информацию по запросу, которая не была выдана предыдущими ответами. Однако при использовании данной функции *Chat GPT* может

выдать тот же ответ, но в другой формулировке, или представить ложную информацию [21-23].

Для получения наиболее полной информации о потенциальных опасностях, их причинах, последствиях и мерах по их снижению, требуется вводить запросы *n*-ое количество раз. Чтобы определить оптимальное количество повторений для получения достоверного ответа на введенный вопрос, был проведен эксперимент.

Эксперимент включал в себя ввод 10 различных запросов, связанных с опасностями на анализируемом объекте, и для каждого из них было сделано 20 повторений. Анализ полученного набора ответов позволил определить, после какого количества повторных запросов *Chat GPT* переставал генерировать новую информацию или выдавал информацию, которая не считалась достоверной или полезной.

Ход эксперимента имеет следующий вид:

1. Ввод данных об опасном производственном объекте, включая описание технологических процессов, характеристики опасных веществ, обращающихся на данном объекте, а также перечень оборудования и другие сведения.

2. Ввод запросов, направленных на выявление причин, последствий и мер по снижению опасностей, таких как изменение давления и температуры. В общей сложности, формулируется 10 разных запросов, и каждый из них повторяется 20 раз.

3. Проведение анализа, в ходе которого выделяется новая информация из ответов.

4. Формулирование вывода о количестве запросов, необходимых для получения наиболее полной и достоверной информации.

В процессе эксперимента для опасности «Снижение давления» было выявлено, что после шестого повторения *Chat GPT* либо предоставляет информацию, идентичную предыдущим ответам, либо представленную информацию нельзя считать достоверной. Кроме того, была отмечена точность определения параметров снижения давления: причины снижения давления с точностью 66,7% (т.е. из шести причин выявлены четыре), последствия – с точностью 80%, а меры по защите – с точностью 33,3%.

В результате проведенного эксперимента для опасности «Увеличение давления» было выявлено, что после восьмого повторения *Chat GPT* либо предоставляет ту же информацию, что и ранее, либо эта информация не является достоверной. Также было установлено, что *Chat GPT* демонстрирует точность 50% при определении причин повышения давления, последствий – 80%, мер защиты – 50%.

Результаты эксперимента для опасности «Снижение температуры», показали, что после 8-го повторения *Chat GPT* предлагает такую же информацию, что и в предыдущих ответах, либо эта информация не является достоверной. Также было отмечено, что *Chat GPT* определяет причины уменьшения температуры с точностью 50%, меры защиты – также 50%, но для последствий не предоставляет достоверной информации.

После проведения эксперимента для опасности «Увеличение температуры», было обнаружено, что после 8-го повторения *Chat GPT* либо повторяет ту же информацию, что и ранее, либо предоставляет ненадежные данные. Также было установлено, что *Chat GPT* определил причину повышения температуры, но при этом предложил еще несколько причин, не учтенных экспертами при качественной оценке.

Исходя из проведенного эксперимента, можно заключить, что для получения наиболее полной и достоверной информации из ответов на заданный вопрос необходимо повторить запрос 8 раз. Это связано с тем, что после восьмого запроса *Chat GPT* предоставляет одинаковую информацию или же новая информация является недостоверной.

Шаг 3: Проведение оценки рисков. После создания контекста для *Chat GPT*, следующим шагом будет использование модели для проведения оценки рисков аварии. На этом шаге в модель вводятся необходимые данные, на основе которых *Chat GPT* генерирует ответы на запросы. Затем из этих ответов сформируется отчет, содержащий результаты качественной оценки риска.

Шаг 4: Проверка проведенной оценки. Для обеспечения точности и надёжности полученной оценки рисков, она должна быть проверена и подтверждена экспертами в соответствующей области. Основной задачей этого этапа является детальный анализ созданного отчета с целью определения точности отраженных факторов риска и предоставления рекомендаций по их снижению.

В процессе проверки и уточнения были использованы результаты применения метода «Анализ опасности и работоспособности» для участков магистрального трубопровода, проведенные в рамках разработки обоснований безопасности.

Описанная методика проведения качественной оценки риска аварий с использованием *Chat GPT* представляет собой структурированный и системный подход к выявлению и управлению потенциальными опасностями. Используя *Chat GPT*, эту методику можно оптимизировать для обеспечения точности и эффективности выявления опасностей, оценки рисков и снижения рисков. Таким образом, данная методика может способствовать повышению безопасности опасных производственных объектов и предотвращению аварий.

Для проверки разработанной методики необходимо: 1) провести оценку риска с помощью *Chat GPT*; 2) сравнить результаты проведенной оценки риска с результатами качественной оценки риска, выполненной экспертами.

После сбора информации по анализируемому объекту были сформированы исходные данные, которые были введены в диалоговое окно *Chat GPT* с запросом на анализ введенного текста. Это дейст-

вие выполняется для формирования представления об объекте, на котором будет проводиться анализ риска.

Важно отметить, что основываясь на результатах описанного выше эксперимента, при оценке риска с использованием *Chat GPT* все запросы были повторены 8 раз. Кроме того, после каждого ответа, сгенерированного *Chat GPT*, ему была дана обратная связь в виде оценки полезности ответа *Chat GPT* в сравнении с предыдущим ответом. Для этого были использованы три оценки, находящиеся в поле ответа, сгенерированного *Chat GPT*:

– «лучше» – если полученный ответ от *Chat GPT* содержит более полную, полезную или достоверную информацию, чем предыдущий ответ;

– «хуже» – если ответ от *Chat GPT* содержит ложную информацию или противоречит предыдущему ответу;

– «так же» – если ответ от *Chat GPT* содержит ту же информацию, что и предыдущий ответ, отличаясь только формулировкой.

Оценка ответов необходима для предоставления возможности *Chat GPT* анализировать ошибки и улучшать информативность своих ответов.

Следующим шагом после внесения исходных данных в *Chat GPT* было выявление потенциальных опасностей на объекте. Для этого в диалоговое окно был введен соответствующий запрос. Благодаря ранее введенному описанию объекта, модель *Chat GPT* учла эту информацию при генерации ответа и предоставила следующий список опасностей, относящихся к анализируемому объекту:

– Снижение давления в нефтепроводе;
– Повышение давления в нефтепроводе;
– Уменьшение температуры в нефтепроводе;
– Повышение температуры в нефтепроводе;
– Уменьшение расхода нефти;
– Повышение расхода нефти;
– Повреждение/отказ технологического трубопровода;
– Повреждение/отказ резервуара;
– Отсутствие соблюдения графика проведения мероприятий по техническому обслуживанию и ремонту;
– Низкое качество ремонтных работ;
– Низкий уровень обучения персонала.

Затем для каждой выявленной опасности были установлены причины их возникновения, последствия для безопасности, окружающей среды и эксплуатации, меры безопасности путем введения в диалоговое окно соответствующих запросов.

Для опасности «снижение давления в нефтепроводе» *Chat GPT* определил следующее:

– Причины: утечка нефти из-за коррозии, повреждения трубопровода; засор в трубопроводе; неисправность клапана, насосной системы; изменения температуры нефти; внешние факторы (стихийные бедствия и т.д.); изменения температуры окружающей среды; работы по техническому обслуживанию; превышение пропускной способности; механические повреждения трубопровода; перебои в подаче электроэнергии.

– Последствия для: безопасности – повреждение трубопровода, утечка нефти, возникновение пожара и/или взрыва; окружающей среды – утечка нефти, загрязнение почвы, водных ресурсов и воздуха; эксплуатации – нарушение технологических процессов, экономические убытки, остановка производства.

– Меры защиты: регулярный осмотр и техническое обслуживание трубопровода; установка датчиков мониторинга давления; внедрение системы автоматического отключения; установка аварийных предохранительных клапанов; система для обнаружения утечек; применение материалов, устойчивых к коррозии; обучение персонала действиям в случае аварийной ситуации; разработка и реализация плана аварийного реагирования; установка резервных систем; соблюдение нормативных требований; установка автоматических запорных клапанов.

Для опасности «повышение давления в нефтепроводе» *Chat GPT* определил следующее:

– Причины: превышение пропускной способности; засор в трубопроводе; неисправность оборудования; изменения температуры нефти; изменения температуры окружающей среды; повышенная производительность нефтяных скважин.

– Последствия для: безопасности – нарушение целостности трубопровода, утечка нефти, пожар, взрыв; окружающей среды – утечка нефти, загрязнение почвы, воздуха; эксплуатации – нарушение технологического режима, экономические потери, остановка производства.

– Меры защиты: установка автоматических запорных клапанов; датчиков мониторинга давления; внедрение системы автоматического отключения; проведение регулярного осмотра и технического обслуживания трубопровода; обучение персонала действиям в случае аварии; установка клапанов регулирования потока; разработка и реализация плана аварийного реагирования; оснащение трубопровода аварийными предохранительными клапанами; система мониторинга и контроля; устройства предотвращения изменения направления потока нефти.

Для опасности «уменьшение температуры в нефтепроводе» *Chat GPT* определил следующее:

– Причины: изменения наружной температуры; уменьшение скорости потока; охлаждающий эффект грунта; неисправность насоса; изменения параметров процесса; плохая изоляция нефтепровода; изменения свойств нефти; неисправность системы поддержания температуры нефти; отключение электроэнергии; снижение расхода нефти; изменение давления; отказ датчиков температуры.

– Последствия для: безопасности – повреждение трубопровода, утечка нефти, возникновение пожара и/или взрыва; окружающей среды – утечка нефти, загрязнение почвы, водных ресурсов и воздуха; эксплуатации – нарушение технологических процессов, экономические убытки, остановка производства.

– Меры защиты: использование изолирующих материалов; установка кабелей обогрева вдоль трубопровода; внедрение автоматической системы контроля температуры; проведение регулярного осмотра и технического обслуживания трубопровода; разработка плана аварийного реагирования; установка резервных систем отопления; обучение персонала действиям в случае аварии; увеличение расхода нефти; использование добавок для предотвращения изменений температуры.

Для опасности «повышение температуры в нефтепроводе» *Chat GPT* определил следующее:

– Причины: изменения температуры окружающей среды; повышение расхода нефти; засор в трубопроводе; неисправность оборудования; контакт с тепловым источником; изменения свойств нефти; сбои в работе охлаждающего оборудования; неисправность/отказ электрооборудования; увеличение скорости потока; изменение технологического процесса.

– Последствия для: безопасности – нарушение целостности трубопровода, разгерметизация, утечка нефти, пожар, взрыв; окружающей среды – утечка нефти, загрязнение почвы, воздуха; эксплуатации – нарушение технологического режима, экономические потери, остановка производства.

– Меры защиты: регулярный осмотр и техническое обслуживание; непрерывный мониторинг температуры нефти с помощью датчиков; резервирование системы охлаждения; автоматическая система отключения; разработка плана аварийного реагирования; обучение персонала действиям в случае аварии; применение изолирующих материалов.

Для опасности «уменьшение расхода нефти» *Chat GPT* определил следующее:

– Причины: утечка нефти; изменение свойств нефти; неисправность оборудования; засор в трубопроводе; ненадлежащее техническое обслуживание.

– Последствия для: безопасности – отказ оборудования; окружающей среды – утечка нефти, загрязнение почвы, воздуха; эксплуатации – нарушение технологического режима, экономические потери, остановка производства.

– Меры защиты: регулярный осмотр и техническое обслуживание; установка систем мониторинга и контроля; обучение персонала действиям в случае аварии; модернизация оборудования и машин или оптимизация технологических процессов; внедрение комплексной системы управления безопасностью и охраной окружающей среды для обеспечения соблюдения применимых законов, правил и отраслевых стандартов; установка дополнительного контрольного оборудования; разработка плана аварийного реагирования.

Для опасности «повышение расхода нефти» *Chat GPT* определил следующее:

– Причины: неисправность оборудования; ненадлежащее техническое обслуживание; утечка нефти.

– Последствия для: безопасности – повреждение трубопровода, утечка нефти, возникновение по-жара и/или взрыва; окружающей среды – утечка нефти, загрязнение почвы, воздуха; эксплуатации – нарушение технологического режима, экономические потери, остановка производства.

– Меры защиты: установка систем мониторинга и контроля; регулярный осмотр и техническое обслуживание; обучение персонала действиям в случае аварии; модернизация оборудования и машин; установка автоматических запорных клапанов; разработка плана аварийного реагирования.

Для опасности «повреждение/отказ технологического трубопровода» *Chat GPT* определил следующее:

– Причины: коррозия; механические повреждения в результате некачественного выполнения земляных или строительных работ; производственные дефекты (трещины, вмятины, проколы); ненадлежащее техническое обслуживание; старение трубопровода.

– Последствия для: безопасности – нарушение целостности трубопровода, утечка нефти, пожар, взрыв; окружающей среды – утечка нефти, загрязнение почвы, воздуха; эксплуатации – нарушение технологического режима, экономические потери, остановка производства.

– Меры защиты: регулярный осмотр и техническое обслуживание; применение защитных покрытий от коррозии; установка станций катодной защиты; установка систем мониторинга и контроля для обнаружения утечек; обучение персонала действиям в случае аварии; разработка плана аварийного реагирования; применение ингибиторов коррозии; установка систем мониторинга давления; установка аварийных запорных клапанов; установка системы аварийного отключения.

Для опасности «повреждение/отказ резервуара» *Chat GPT* определил следующее:

– Причины: коррозия; механические повреждения в результате некачественного выполнения строительных работ; производственные дефекты (вмятины, трещины); внешние воздействия (удары транспортных средств, падающие предметы и т.д.); ненадлежащее техническое обслуживание старение резервуара.

– Последствия для: безопасности – нарушение целостности резервуара, разгерметизация, утечка нефти, пожар, взрыв; окружающей среды – утечка нефти, загрязнение почвы, воздуха; эксплуатации – нарушение технологического режима, экономические потери, остановка производства.

– Меры защиты: регулярный осмотр и техническое обслуживание; применение защитных покрытий от коррозии; установка систем мониторинга и контроля для обнаружения утечек; обучение персонала действиям в случае аварии; разработка плана аварийного реагирования; соблюдение правил и стандартов по проектированию, установке и эксплуатации резервуаров; проведение периодичных

осмотров и диагностик резервуара.

Для опасности «отсутствие соблюдения графика проведения мероприятий по техническому обслуживанию и ремонту» *Chat GPT* определил следующее:

– Причины: несоблюдение запланированных мероприятий по техническому обслуживанию и ремонту; недостаток ресурсов для своевременного проведения технического обслуживания или ремонта; низкий уровень квалификации работников, выполняющих техническое обслуживание и ремонт; отсутствие надлежащего учета и документации по выполнению технического обслуживания и ремонта.

– Последствия для: безопасности – отказ оборудования, возникновение аварийной ситуации; окружающей среды – утечка нефти, загрязнение почвы, воздуха; эксплуатации – экономические потери, остановка производства.

– Меры защиты: разработка комплексного плана технического обслуживания и ремонта; предоставление достаточного количества ресурсов для выполнения технического обслуживания и ремонта; внедрение системы мониторинга за выполнением графика работ; обучение персонала, выполняющего техническое обслуживание и ремонт; разработка и реализация плана действий при возникновении аварий; внедрение системы отчетности технического обслуживания и ремонта.

Для опасности «низкое качество ремонтных работ» *Chat GPT* определил следующее:

– Причины: применение оборудования, изделий или материалов низкого качества; недостаточная квалификация персонала; использование некачественных устройств и инструментов для производства работ; отсутствие должного контроля за качеством выполнения ремонтных работ; отсутствие/невыполнение графика технического обслуживания и ремонта.

– Последствия для: безопасности – отказ оборудования, возникновение аварийной ситуации; окружающей среды – утечка нефти, загрязнение почвы, воздуха; эксплуатации – нарушение технологического режима, экономические потери, остановка производства.

– Меры защиты: внедрение системы контроля качества ремонтных работ; обеспечение должной подготовки персонала, занимающегося обслуживанием и ремонтом; оснащение работников высококачественным оборудованием, инструментами и материалами, необходимыми для выполнения ремонтных работ; внедрение системы отчетности о проведении ремонтных работ.

Для опасности «низкий уровень обучения персонала» *Chat GPT* определил следующее:

– Причины: отсутствие программ обучения работников необходимым знаниям и навыкам; отсутствие проверок знаний и навыков работников; высокая текучесть кадров.

– Последствия для: безопасности – возникновение аварийной ситуации; окружающей среды – утечка нефти, загрязнение почвы, воздуха; эксплуатации – нарушение технологического режима, экономические потери, остановка производства.

– Меры защиты: разработка и реализация программы обучения персонала; проведение обучения персонала необходимым знаниям по эксплуатации, обслуживанию оборудования и устройств; проведение программы повышения квалификации; проведение регулярных проверок знаний и навыков работников.

Приведенные формулировки были адаптированы в части терминологии и приведены в формат, удобный для восприятия специалистами по анализу риска.

Далее необходимо проверить правильность определения причин, последствий и мер безопасности, предложенных *Chat GPT* на основе выявленных им причин. Для этого сгенерированные *Chat GPT* ответы были сравнены с тем, что было представлено в *HAZOP*, проведенном без использования нейросети.

Сравнение проводилось по следующим видам отклонений:

1. Отклонения технологических параметров процесса транспорта (снижение давления в нефтепроводе, увеличение давления в нефтепроводе, снижение температуры в нефтепроводе, увеличение температуры в нефтепроводе, снижение расхода нефти, увеличение расхода нефти).

2. Отказы оборудования (повреждение/отказ технологического трубопровода, повреждение/отказ резервуара).

3. Нарушения регламента технического обслуживания (отсутствие соблюдения графика проведения мероприятий по техническому обслуживанию и ремонту, низкое качество ремонтных работ, низкий уровень обучения персонала).

В результате сравнения причин, последствий и мер защиты для отклонений технологических параметров процесса транспорта, был сделан вывод о том, *Chat GPT* выявляет причины отклонений примерно такие же, как представлены в анализе, проведенном без использования нейросети. При этом последствия для всех отклонений технологических параметров процесса транспорта определены одинаково, даже в случаях, где эксперты установили незначительные последствия. Однако предлагаемые меры безопасности в основном являются общими и не затрагивают конкретные отклонения. Это связано с недостатком информации о технологических процессах, протекающих на анализируемом объекте.

Результаты проведенного сравнительного анализа причин, последствий и мер защиты для отклонений отказа оборудования позволяют сделать вывод, что *Chat GPT* определяет причины и последствия отклонений схожие с теми, что были установлены экспертами. Однако, в отличие от анализа, проведенного без участия нейросети, *Chat GPT* не учитывает техническое обслуживание оборудования при предложении мер безопас-

ности. То есть, он не указывает периодичность проверок оборудования, а также не ссылается на соответствующие документы, определяющие эту периодичность. Это объясняется ограниченными знаниями *Chat GPT* в области законодательства Российской Федерации о промышленной безопасности, а также невозможностью предоставить для анализа изображений технологической схемы и плана анализируемого объекта, поскольку *Chat GPT* оперирует только текстовой информацией.

После сравнения причин, последствий и мер защиты для нарушений регламента технического обслуживания был сделан вывод о том, что *Chat GPT* не справился должным образом с выявлением последствий отклонений в отношении безопасности. В информации, предоставленной *Chat GPT*, отсутствуют упоминания о нарушении требований промышленной безопасности объекта и нарушении технологического процесса, которые являются основными последствиями указанных отклонений. Однако причины и меры безопасности в данном разделе определены более точно, чем в предыдущих двух разделах. Хотя *Chat GPT* пропустил некоторые причины и меры, указанные экспертами, он сгенерировал информацию, более точно соответствующую результатам *HAZOP*. Однако в предложенных *Chat GPT* мерах безопасности не хватает указания требований законодательства Российской Федерации.

На основании результатов апробации методики использования искусственного интеллекта для оценки риска аварий, было установлено, что нейросеть *Chat GPT* может эффективно применяться для качественной оценки рисков, выступая в качестве вспомогательного инструмента для экспертов. Хотя *Chat GPT* не способен самостоятельно выявить все потенциальные угрозы на основе предоставленной информации, его применение позволяет обнаружить основные отклонения, их причины, возможные последствия, а также сформулировать рекомендации по снижению уровня опасности.

**Обсуждение.** По результатам исследования выявлено, что нейросеть *Chat GPT* способна провести качественную оценку риска аварий, однако не в полном объеме, т.е. она способна выявить только некоторые опасности. Для выполнения более детальной оценки риска необходимо предоставить *Chat GPT* значительный объем информации, включая специфические особенности анализируемого объекта, его технологические процессы, оборудование, местоположение, а также соответствующую техническую и нормативную документацию. Однако даже с предоставлением этой информации, *Chat GPT* может пропустить некоторые аспекты и не определить потенциальные опасности.

Для упрощения качественной оценки риска аварий эксперт может использовать *Chat GPT* как вспомогательный инструмент. Однако для более точного и детального проведения анализа риска требуется создание отдельной нейронной сети, предназначенной для качественной оценки риска аварий. Эта сеть должна быть обучена на определение опасностей, отклонений, их причин, последствий и так далее. Также важно учитывать возможность анализа не только текстовой информации, но и изображений, таких как схемы технологических процессов. Это позволит более точно определить опасность и предложить меры по ее снижению. В результате проведения качественной оценки риска аварий с помощью такой нейросети может быть создана таблица, в которой будут указаны все выявленные отклонения, их причины, последствия и предложенные меры по снижению риска опасностей.

В целом приведенные авторами статьи сведения показывают, что на современном уровне развития нейросети она пока является достаточно поверхностным инструментом, речь пока не идет полноценной заменой ею не только математического моделирования опасных процессов в тефносфере (для количественных оценок риска), но даже своего аналога – экспертного опроса (для их качественных оценок). И главным образом, именно потому, эксперты обладают пониманием природы этих процессов.

**Выводы.** В результате проведенного исследования было установлено, что нейросеть *Chat GPT* обладает рядом возможностей для качественной оценки риска аварий. Она способна:

1. Оценивать критичность опасности, используя категории «низкая», «средняя» или «высокая».
2. Перечислять возможные причины отклонений.
3. Описывать потенциальные последствия этих отклонений.
4. Предлагать меры защиты и барьеры безопасности.
5. Давать рекомендации по снижению уровня опасности.

На основе выявленных возможностей была разработана методика применения искусственного интеллекта для качественной оценки риска аварий, которая прошла апробацию с использованием метода «Анализ опасностей и работоспособности».

Анализ показал, что *Chat GPT* способен выполнять качественную оценку риска, однако его возможности ограничены неполнотой выявления опасностей. Для более детальной оценки необходимо предоставлять значительно больший объем данных, включая информацию об объекте, технологических процессах, оборудовании, а также нормативной и технической документации. Даже с полным объемом данных *Chat GPT* может упускать часть важной информации, что сказывается на полноте анализа риска.

Таким образом, *Chat GPT* может использоваться для упрощения предварительного анализа риска, но для более глубокого и точного анализа требуется разработка специализированной нейронной сети. Такая сеть должна быть обучена на большем объеме

данных для точного выявления опасностей, их причин и последствий, а также для оценки технологических схем и изображений. Итогом работы такой системы могла бы стать таблица с выявленными отклонениями, их причинами, последствиями и предложенными мерами по снижению риска.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Федеральный закон от 14.07.2022 N 276-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности».

2. Федеральный закон от 22.07.2008 N 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности».

3. Приказа Ростехнадзора от 03.11.2022 N 387 «Об утверждении Руководства по безопасности «Методические основы анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах».

4. Букенова, И. Использование чат-ботов на основе нейросетей в программировании: обзор / И. Букенова, М. Жасұзақова, Б. Талпакова, Т. Хусаинов // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. – 2023. – № 3(126). – С. 222-231. – DOI 10.52167/1609-1817-2023-126-3-222-231. – EDN ZVZPZS.

5. Краковский, И.В. Текстовые нейронные сети: возможности, применение и перспективы развития / И.В. Краковский, П.Г. Асалханов // Научные исследования студентов в решении актуальных проблем АПК: Материалы Всероссийской студенческой научно-практической конференции. В III томах, Иркутск, 16-17 февраля 2023 года. Том II. – п. Молодежный: Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, 2023. – С. 262-267. – EDN RUSREO.

6. Шаяхметов, И.М. ChatGPT на основе нейронной сети / И.М. Шаяхметов, С.З. Мурзин, А.А. Тынышбаев // Тенденции развития науки и образования. – 2023. – № 95-6. – С. 48-50. – DOI 10.18411/tmio-03-2023-283. – EDN RCASBP.

7. Гимранов, А.И. Что такое языковые модели и как работает ChatGPT / А.И. Гимранов, А.И. Иванова // Профессиональные коммуникации в научной среде – фактор обеспечения качества исследований: Материалы XII Всероссийской научно-практической конференции, Альметьевск, 27 апреля 2023 года / Под редакцией Р.С. Шамсутдинова [и др.]. – Санкт-Петербург: Общество с ограниченной ответственностью Издательский дом «Сциентиа», 2023. – С. 361-365. – EDN FHNZNI.

8. Ивахненко, Е.Н. ChatGPT в высшем образовании и науке: угроза или ценный ресурс? / Е.Н. Ивахненко, В.С. Никольский // Высшее образование в России. – 2023. – Т. 32, № 4. – С. 9-22. – DOI 10.31992/0869-3617-2023-32-4-9-22. – EDN TZHIHU.

9. Лукичев, П.М. Применение искусственного интеллекта в системе высшего образования / П.М. Лукичев, О.П. Чекмарев // Вопросы инновационной экономики. – 2023. – Т. 13, № 1. – С. 485-502. – DOI 10.18334/vinec.13.1.117223. – EDN QBTLXD.

10. Войтович, А.А. Применение ChatGPT в медицине/ А.А. Войтович, Н.В. Свороб // Электронные системы и технологии: Материалы 59-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 17-21 апреля 2023 года. – Минск: Научное электронное издание, 2023. – С. 796-797. – EDN GPSVAY.

11. Шадеркина В.А. ChatGPT в медицине: возможности и ограничения. Аналитический обзор // Журнал телемедицины и электронного здравоохранения. – 2024. – №1.

12. Ядова, Н.Е. Перспективы внедрения нейросети GPT-3 в современной экономике / Н.Е. Ядова, К.И. Кочетков, М.О. Курбонмамадов // Актуальные вопросы экономических наук и современного менеджмента: сборник статей по материалам LXIX международной научно-практической конференции, Новосибирск, 05 апреля 2023 года. Том 4 (53). – Новосибирск: Общество с ограниченной ответственностью "Сибирская академическая книга", 2023. – С. 5-14. – EDN VZOBKR.

13. *Chat GPT* and its influence on modern business / A. Pyko, Y. Sokolovskaya, E. Stolyarova, E. Provotorova // Бизнес. Образование. Экономика: Материалы Международной научно-практической конференции, Минск, 06-07 апреля 2023 года. – Минск: Государственное учреждение образования "Институт бизнеса Белорусского государственного университета", 2023. – P. 115-118. – EDN YAOQZL.

14. Якименко, Д.Д. Использование GPT-чата в предпринимательской деятельности / Д.Д. Якименко // Экономика сегодня: современное состояние и перспективы развития (Вектор-2023): Сборник материалов Всероссийской научной конференции молодых исследователей с международным участием, Москва, 25 мая 2023 года. Том Часть 5. – Москва: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)", 2023. – С. 232-235. – EDN CHMYXU.

15. Загорская, А.В. Применение GPT-чата в научном исследовании: возможности и ограничения / А.В. Загорская // Строительное производство. – 2023. – № 3. – С. 41-48. – DOI 10.54950/26585340_2023_3_41. – EDN GWTFGC.

16. Полонец, Л.А. Возможности chatgpt и как нейросеть влияет на деятельность людей / Л.А. Полонец, Т.А. Пукелова // Современные аспекты экономики и управления: Материалы Международной студенческой научно-практической конференции, Новосибирск, 25 мая 2023 года. – Новосибирск: Издательский центр Новосибирского государственного аграрного университета "Золотой колос", 2023. – С. 215-218. – EDN SHSRJR.

17. Колесников Е.Ю., Теляков Э.Ш. Качественный и количественный этапы оценки неопределённости аварийного риска // Вестник Казанского технологического университета. 2014. – № 23.

18. Габдулхаков Р.Р., Ягудин Р.И., Бахтияров А.М., Елизарьева Е.Н., Марванов Р.В. Сравнительный анализ современных методов оценки риска для обеспечения безопасности // БРНИ. – 2017. – №1-2.

19. Колесников Е.Ю., Теляков Э.Ш. О роли методологии анализа риска в управлении пожарной и промышленной безопасностью // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – №1.

20. Буканов Ф.Ф., Ворожейкин В.Н. Метод анализа риска при обеспечении безопасности промышленного предприятия // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2013. – №4.

21. Рупасов К.Р., Тесленко Е.А., Пионтковская С.А. Нейросеть ChatGPT: революция в мире искусственного интеллекта // Вестник науки. – 2024. – №7 (76).

22. Харламов А.А. ChatGPT это интеллектуальная система? // Речевые технологии/Speech Technologies. 2024. – №1.

23. Маляревич Д.В. ChatGPT и наука: взаимодействие научного сообщества и искусственного интеллекта // Векторы благополучия: экономика и социум. – 2024. – №2 (53).

*Статья поступила в редакцию 12.10.2024*
*Статья принята к публикации 13.12.2024*

УДК: 614.84
EDN: ULBOBI

# НОВЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ И НОРМИРОВАНИЮ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА НА ЧЕЛОВЕЧЕСКОЕ ТЕЛО ПРИ ПОЖАРЕ

© Авторы 2024

SPIN: 5658-8961
AuthorID: 981025
ORCID: 0000-0002-3239-0758
ScopusID: 57212554371

**СЕРГЕЕВА Маргарита Дмитриевна**, аспирант
*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*
*(Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, e-mail: antonova.md@edu.spbstu.ru)*

SPIN: 9473-1733
AuthorID: 693078
ORCID: 0000-0003-0833-6863
ScopusID: 57212259662

**КОЛЕСНИКОВ Евгений Юрьевич**, доктор технических наук, профессор,
профессор Высшей школы техносферной безопасности
*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*
*(Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, e-mail: key3108@ya.ru)*

**Аннотация.** Целью данного исследования является совершенствование методики оценки риска повреждений от воздействия теплового потока при авариях, связанных с горением углеводородов. Современные методы расчета показателей пожарного риска, применяемые в России, основываются на методиках, разработанных зарубежными коллегами. Однако в данных руководствах не учтен ряд важных аспектов. В процессе исследования было осуществлено моделирование, результаты которого позволяют определить зависимость степени повреждения живых тканей от интенсивности и времени воздействия теплового потока. Данная зависимость является основой для математической модели, описывающей воздействие на человеческое тело оптического излучения широкого спектра, излучаемого при горении углеводородов. Результаты математического моделирования являются основой для разработки подхода к оценке индивидуальных показателей пожарного риска, нормированию тепловых повреждений организма при различной продолжительности воздействия и интенсивности теплового излучения. Полученные результаты могут стать основой для усовершенствования действующей нормативно-правовой базы в области обеспечения пожарной безопасности и охраны труда.

**Ключевые слова:** горение углеводородов, оценка риска, воздействие теплового потока, аварии, математическое моделирование.

# A NEW APPROACH TO ASSESSING AND NORMALIZING THE EFFECT OF HEAT FLUX ON THE HUMAN BODY IN A FIRE

© The Authors 2024

**SERGEEVA Margarita Dmitrievna**, postgraduate student
*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*
*(Russia, 195251, St. Petersburg, st. Politekhnicheskaya, 29, e-mail: antonova.md@edu.spbstu.ru)*

**KOLESNIKOV Evgeniy Yuryevich**, doctor of technical sciences, professor,
professor of the Higher School of Technosphere Safety
*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*
*(Russia, 195251, St. Petersburg, st. Politekhnicheskaya, 29, e-mail: key3108@ya.ru)*

**Abstract.** The objective of this study is to improve the methodology for assessing the risk of damage caused by exposure to thermal flux during accidents involving hydrocarbon combustion. The current methods for calculating fire risk indicators used in Russia are based on methodologies developed by foreign colleagues. However, these guidelines do not take into account several important aspects. As part of the research, an experiment was conducted, the results of which allow for determining the relationship between the degree of tissue damage and the intensity and duration of thermal flux exposure. This relationship serves as the foundation for a mathematical model that describes the impact of broadband optical radiation on the human body emitted during hydrocarbon combustion. The results of the mathematical modeling form the basis for developing an approach to assessing individual fire risk indicators, standardizing thermal damage to the body under varying exposure durations and thermal radiation intensities. The obtained results can become the basis for improving the current regulatory and legal framework in the field of fire safety and labor protection.

**Keywords:** hydrocarbon combustion, risk assessment, heat flow impact, accidents, mathematical modeling.

*Для цитирования: Сергеева М.Д. Новый подход к оценке и нормированию воздействия теплового потока на человеческое тело при пожаре / М.Д. Сергеева, Е.Ю. Колесников // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 4(68). – С. 270-274. – EDN: ULBOBI.*

**Введение.** Концепция оценки воздействия теплового потока при пожарах играет ключевую роль в обеспечении безопасности как на производственных, так и на общественных объектах. Основная сложность в процессе оценки заключается в многофакторном учете различных аспектов, влияющих на итог аварийной ситуации. Среди подобных факторов можно выделить интенсивность и продолжительность воздействия теплового потока, а также характеристика объекта, как наиболее значимые аспекты при оценке воздействия теплового потока на человека.

Основной задачей математического моделирования в области пожарной безопасности является разработка и совершенствование методик оценки последствий воздействия теплового потока с использованием комплексного подхода, обеспечивающего многофакторный учет различных характеристик пожара.

На сегодняшний день оценка последствий воздействия теплового потока при пожарах осуществляется с использованием ряда методик, однако, большая часть из них основана на зарубежных разработках. В качестве примера можно привести методику определения расчетных значений пожарного риска на производственных объектах, утвержденной приказом МЧС России от 10.07.2009 № 404 [1]. Эта методика позволяет оценивать зависимость интенсивности теплового потока, падающего на целевой объект, от его расстояния до очага при различных сценариях аварий (пожар разлива углеводородов, факельное горение, огненный шар), а также значение показателя индивидуального пожарного риска (вероятность смертельной травмы для людей) [2-6].

В большинстве современных методик, применяемых в Российской Федерации, внимание акцентируется на расчете безопасного расстояния до очага возгорания и на прогнозировании последствий различных сценариев пожара. Однако особенности оптического спектра излучения, возникающего при пожарах с горением углеводородов, а также влияние этих характеристик на степень термических повреждений человека не учтены. В результате этого возникают трудности в корректном комплексном нормировании безопасности как при проектировании объектов, так и при разработке профилактических мероприятий по минимизации риска травмирования в случае аварии.

Важной особенностью современных методик оценки является использование универсальных расчетных формул для оценки общих показателей пожарного риска. Данный аспект позволяет говорить о неточности универсальных моделей, применяемых для оценки общих показателей пожарного риска. Для качественного прогнозирования индивидуального риска получения повреждений при определенных условиях необходимо проведение дополнительных исследований, направленных на создание более точных моделей оценки воздействия теплового потока на организм человека.

Длинноволновое излучение проникает глубже в ткани человеческого тела, что делает тепловое излучение углеводородов наиболее опасным. В настоящее время проблема оценки реакции человеческих тканей на тепловое излучение от пламени при горении углеводородов недостаточно изучена, и поэтому актуально математическое моделирование сопряженных процессов переноса излучения и теплопередачи в верхних слоях тканей человеческого тела. Воздействие теплового потока аварийного горения углеводородов на живые ткани может быть успешно оценено в рамках математического моделирования [17-21].

Целью данного исследования является устранение ключевых недостатков существующих методик оценки воздействия теплового потока на человеческое тело и разработка более точной адаптивной методики взамен используемых на данный момент. Разработка усовершенствованных моделей, а также экспериментальная проверка их адекватности обусловлена, позволяют уточнить критерии безопасного проектирования и эксплуатации объектов с потенциальной угрозой возникновения аварий с горением углеводородов.

Объектом данного исследования является человеческое тело, подвергающееся воздействию теплового излучения при горении углеводородов в условиях техногенных аварий. Предметом исследования выступает метод оценки показателей риска получения травм человеком при воздействии теплового потока в авариях, связанных с горением углеводородов.

**Методология.** Методы расчета интенсивности теплового потока, а также другие значения в рамках методологии оценки индивидуального риска, содержатся во многих зарубежных источниках [7-12]. В частности, рекомендации Нидерландской организации прикладных научных исследований (*TNO*) отличаются высокой степенью проработки данного вопроса – это известные «цветные» книги: красная книга CPR 12E, желтая книга CPR 14E, зеленая книга CPR 16E и фиолетовая книга CPR 18E [13-16].

Эти методы основываются на исследованиях, проведенных американскими учеными в Хиросиме после атомной бомбардировки в 1945 году.

Несмотря на детальную проработку сущест-

вующих методик, они не учитывают ряд важных аспектов:

– Различия в спектре излучения, обусловленные тем, что тепловой поток огненного шара при ядерном взрыве отличается от теплового потока при горении углеводородов. Температура огненного шара при ядерном взрыве достигает 10000 К, что (1 мкм), тогда как температура пламени при горении углеводородов значительно ниже (около 1300 К), что концентрирует излучение в инфракрасной области спектра.

– Необходимость учета эвакуации человека от источника пожара в условиях аварийного горения углеводородов.

Целью данного исследования является совершенствование методики оценки риска повреждений от воздействия теплового потока при авариях, связанных с горением углеводородов. Независимо от того, насколько полна и точна разработанная математическая модель, она обязательно должна быть подтверждена экспериментально. Ввиду невозможности проведения эксперимента на живых существах, актуальна задача проведения эксперимента на аналоге живой ткани.

Для достижения цели были определены следующие задачи:

1. Математическое моделирование сопряженной задачи переноса инфракрасного излучения и теплообмена в верхних слоях тканей.

2. Проведение эксперимента, определяющего зависимость степени термического повреждения от параметров теплового излучения.

3. Разработка подхода к оценке индивидуального пожарного риска и нормированию теплового воздействия.

Для решения поставленных задач были использованы следующие методы:

1. Анализ, с помощью которого были изучены основные физико-химические показатели теплового излучения.

2. Синтез для разработки методики оценки повреждений человека от теплового излучения при горении углеводородов.

3. Математическое моделирование, благодаря которому на базе *COMSOL Multiphysics* будет разработана модель, учитывающая спектральные характеристики излучения и свойства объекта.

4. Верификация и валидация модели для ее проверки на соответствие физическим законам при экспериментально подтвержденных результатах.

**Результаты.** Математическое моделирование было проведено с использованием программы *Comsol Multiphysics*, которая позволяет моделировать как сопряженные, так и раздельные физические процессы.

Для решения поставленных задач был применен модуль теплопередачи в твердых телах, который обеспечил точность моделирования.

Для моделирования использовалась модель кожного покрова, представляющая собой слой кожи толщиной 1 мм, натянутый на слой мышечной ткани толщиной 2 см.

Интенсивность теплового потока, падающего на поверхность образца, составляла $q = 5$ кВт/м².

Радиус отверстия в металлической пластине составлял 3 см, длина образца – 6 см.

Параметры были выбраны с целью более точной имитации локального воздействия теплового излучения на небольшой участок человеческой кожи.

Уравнение теплопроводности, используемое в процессе моделирования, имеет следующий вид:

$$d_z \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + d_z \rho C_p u * \nabla T + \nabla * q - d_z Q + q_o + d_z Q_{tod}$$

$$q = -d_z k \nabla T$$

где:

$\rho$ – плотность,

$c$ – удельная теплоемкость,

$T$ – температура,

$k$ – теплопроводность,

$q$ – источник теплового излучения с интенсивностью 5 кВт/м².

Предполагается, что тепло в целевом объекте распространяется в различных направлениях за счет теплопроводности:

$$q_{провод} = k \nabla T$$

На нижней границе модели было задано условие теплоизоляции, означающее отсутствие теплового потока через эту границу. Благодаря установленному параметру тепло распространяется по образцу в вертикальном направлении, за исключением нижнего.

Критерием для остановки симуляции являлось достижение температуры поверхности образца, при которой возникает ожог первой степени, а именно 51°С. Согласно проведенным расчетам, при заданных условиях ожог первой степени будет получен при воздействии теплового потока в течение 62,7 с (рис. 1).

При аналогичных условиях, согласно результатам моделирования, ожог второй степени будет получен при воздействии теплового потока в течение 80,1 с (рис. 2).

Наконец, ожог третьей степени будет получен при воздействии теплового потока в течение 102,6 с (рис. 3).

Теплофизическими и оптическими свойствами человеческой кожи позволяют говорить о ее схожести с кожей кролика, что делает ее подходящей моделью для проведения экспериментов. Спектр поглощения образцов кожи кролика был получен в Ресурсном центре «Оптические и лазерные методы исследования вещества» Научного парка Санкт-Петербургского государственного университета с использованием спектрофотометра Lambda 1050 от Perkin Elmer (рис. 4).

Для сходимости эксперимента и получения более точных данных об оптических характеристиках было использовано два образца кожи кролика.

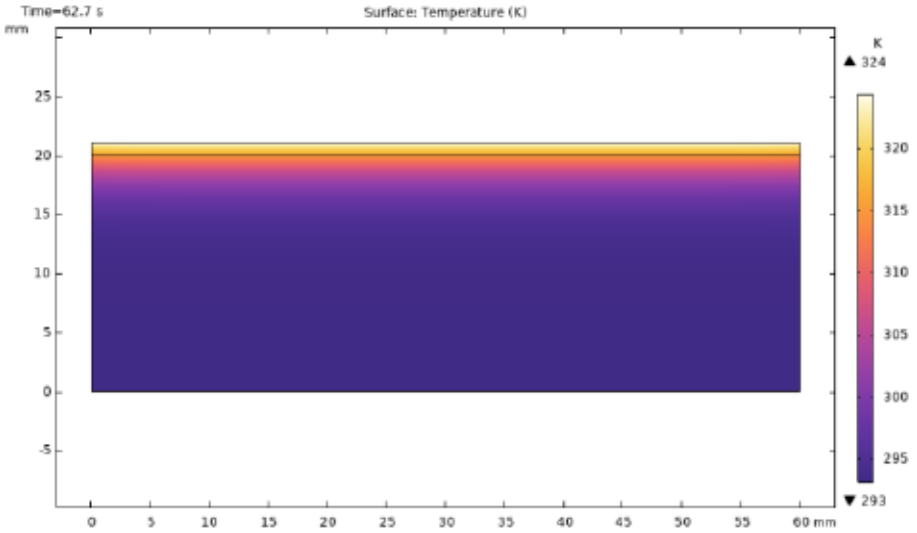



*Рисунок 1 – Зависимость температуры от времени при облучении образца с интенсивностью q=5 кВт/м² (ожог первой степени)*

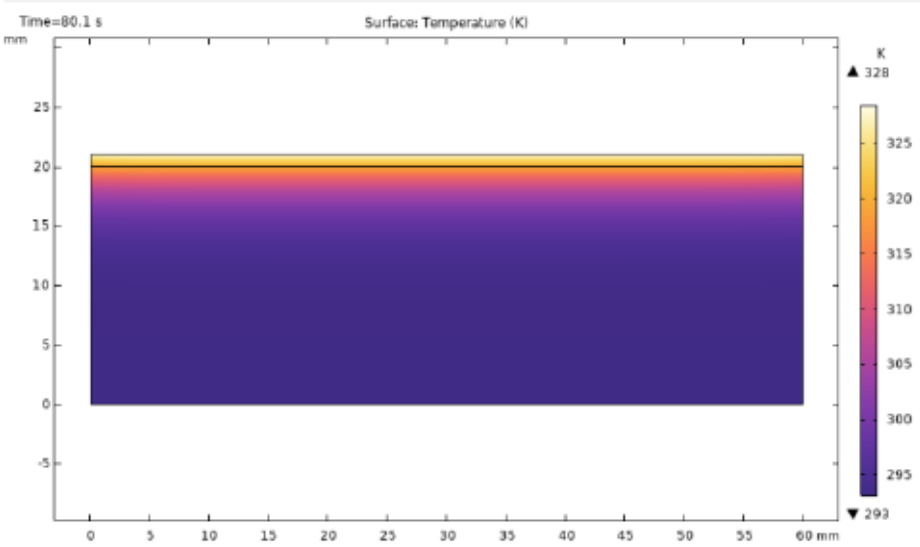



*Рисунок 2 – Зависимость температуры от времени при облучении образца с интенсивностью q=5 кВт/м² (ожог второй степени)*

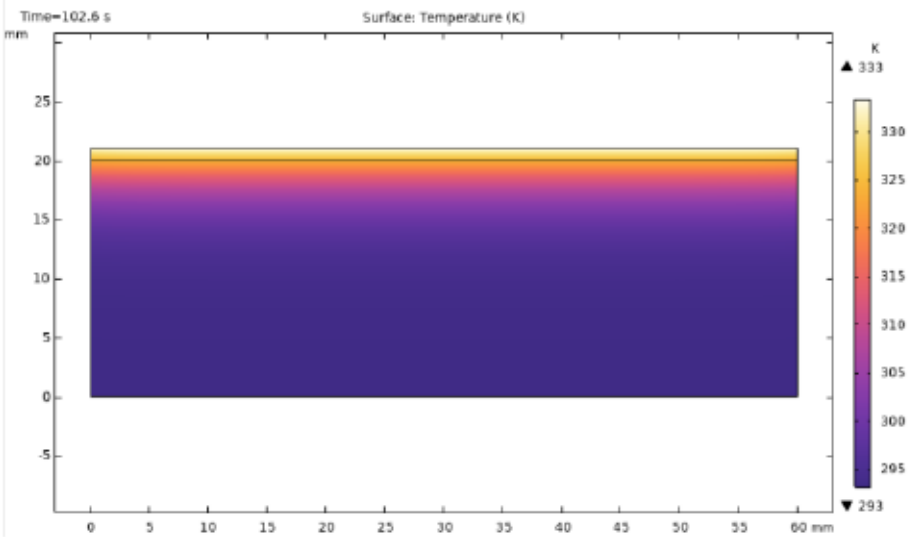



*Рисунок 3 – Зависимость температуры от времени при облучении образца с интенсивностью q=5 кВт/м² (ожог третьей степени)*

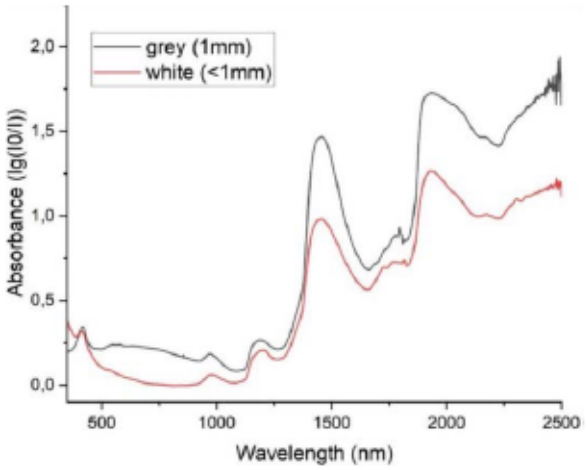



*Рисунок 4 – Спектр поглощения двух образцов кожи кролика*

**Обсуждение.** В ходе проведенного исследования было осуществлено моделирование, результаты которого позволили установить зависимость степени повреждения живых тканей от интенсивности и продолжительности воздействия теплового излучения, а также его спектральных характеристик. Полученные результаты служат основой для разработки усовершенствованной математической модели повреждения человеческого тела, вызванного воздействием излучения различных спектров, включая излучение при горении углеводородов.

Полученные результаты исследования подтвердили необходимость учета спектральных характеристик излучения при моделировании теплового воздействия на живые ткани. Было установлено, что длинноволновые компоненты спектра оказывают значительное влияние на степень повреждения живых тканей. Практическое применение полученных данных обусловлено их использованием при разработке методов защиты человека от теплового излучения при авариях с горением углеводородов. Также полученные результаты позволяют усовершенствовать существующие методики оценки индивидуального риска при тепловом воздействии.

В дальнейшем планируется продолжение исследований с целью оценки динамики повреждения живых тканей при различных условиях теплового воздействия. Для реализации комплексного подхода оценки рисков для различных сценариев аварий необходимо также учитывать скорость изменения температуры, температуру окружающей среды и возможность эвакуации пострадавших.

**Выводы.** В результате проведенного исследования была разработана и улучшена методика оценки риска повреждений человеческого тела от воздействия теплового потока при горении углеводородов. С помощью программы *Comsol Multiphysics* было проведено математическое моделирование процессов переноса теплового излучения и теплообмена в верхних слоях целевого объекта, имитирующего человеческую кожу, при воздействии теплового потока интенсивностью 5 кВт/м², испускаемого абсолютно черным телом при температуре 1000 К. В результате была получена зависимость температуры образца от времени его облучения, а также оценены временные значения, соответствующие получению тканью ожогов I, II и III степеней. Также был получен спектр поглощения двух образцов кожи кролика, которые будут использоваться в качестве имитаторов человеческой кожи в эксперименте для валидации модели.

Данное исследование подчеркивает необходимость проведения дальнейших работ по совершенствованию существующих методик расчета индивидуального риска при различных сценариях аварий. Полученные результаты могут стать основой для усовершенствования действующей нормативно-правовой базы в области обеспечения пожарной безопасности и охраны труда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Methodology for determining the calculated values of fire risk at production facilities: approved by Order of the Ministry of Emergency Situations of Russia No. 404 on 10.07.2009.
2. A. Byzov, A. Telegina, I. Korotkiy, J. Veber, E3S Web of Conferences 140, 08014 (2019).
3. K. Kempna, J. Smolka, M. Kvarcak, I. Kricfalusi, Z. Stejskal, T. Hozjan, D. Kolaitis, J. of Physics: Conference Series 1107(4), 042036 (2018).
4. Y. Tang, J. Jing, Z. Zhang, Y. Yang, Energies 11(1) (2018).
5. F. Khan, S. Rathnayaka, S. Ahmed, Proc. S. and Env. Prot. 98, 116-147 (2015).
6. S.G. Alexeev, Coke and Chem. 61(8) (2018).
7. Z. Tzenova, AIP Conf. Proc. 2048 (2018).
8. L.I. Ushvitskii, T.A. Kulagovskaya, A.A. Ter-Grigor'yants, I.V. Solovyova, E.S. Mezentseva, Int. J. of Econ. and Fin. Is. 5(4) (2015).
9. G. Marroni, V. Casson Moreno, F. Ovidi, T. Chiavistelli, G. Landucci, Ocean Eng. 273 (2023).
10. A.V. Matveev, A.V. Maksimov, O.V. Shcherbakov, A.S.Smirnov, Fire and Exp. S., 27(1), 35-49 (2018).
11. C. Zhang, Proc. Eng. 211, 986-995 (2018).
12. Y. Li, H. Ping, Z. Ma, L. Pan, Environ. S. Pollut. Res. Int. 21(8) (2014).
13. CPR-12E Methods for determining and processing probabilities (Red book). 3-nd ed. (Hague, VROM, 2005), p. 604.
14. CPR-14E Methods for the calculation of Physical Effects (Yellow book). 3-rd. ed. (Hague, VROM, 2005), p. 870.
15. CPR-16E Methods for determination of possible damage to people and objects resulting from releases hazardous materials (Green book) (Voorburg, 1989), p. 337.
16. CPR-18E Guidelines for quantitative risk assessment (Purple book). 2-nd ed. (Hague, VROM, 2005), p. 237.
17. M. Avdeeva, A. Byzov, K. Smyshlyaeva, N. Leonova, Adv. in Int. Syst. and Comp., 1259 AISC, 391-400 (2021).
18. A. Shershneva, A. Andreev, A. Dmitriev, E3S Web of Conf. 140, 08009 (2019).
19. A.V. Ivanov, F.A. Dali, G.K. Ivakhnyuk, M.A. Simonova, D.V. Shikhalev, I.L. Skripnick, J. of App. Eng. Sc. 19, 1 (2021).
20. M. Avdeeva, O. Uzun, N. Chumakov, Tr. Res. Proc. 63 (2022).
21. O.P. Keyn, I.V. Klimova, Bez. Tr. Prom. 2020(9) (2020).

*Статья поступила в редакцию 18.11.2024*
*Статья принята к публикации 13.12.2024*

УДК 613.6
EDN: QTOJSR

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРАВНЕНИЙ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ПО ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОМ СОСТАВЕ

© Автор(ы) 2024
SPIN: 1279-3916
AuthorID: 730124
ORCID: 0000-0001-6399-8902
ScopusID: 57170233100

**ЗАКИРОВА Альфия Резавановна,** кандидат технических наук,
доцент кафедры «Техносферная безопасность»
*Уральский государственный университет путей сообщения*
*(620034, Россия, Екатеринбург, ул. Колмогорова 66, e-mail: AZakirova@usurt.ru)*

**Аннотация.** Электротехнический персонал, обслуживающий электроподвижной состав (ЭПС), попадает под аддитивное воздействие электрических и магнитных полей. Возникает вопрос: как оценивать такие поля, каким образом они изменяются в ЭПС? Решением этого вопроса могут стать энергетические характеристики ЭМП. Цель работы: определение закономерностей изменения энергетических характеристик ЭМП в кабине электроподвижного состава. Для решения проблем потребовалось разработать программу для ЭВМ, позволяющую моделировать энергетические характеристики ЭМП в кабине ЭПС, определить уравнения регрессионных моделей по энергетическим характеристикам ЭМП в ЭПС при нахождении его на однопутной линии. Впервые разработана программа, базирующаяся на энергетических характеристиках ЭМП. Для прогнозирования аддитивного воздействия электрических и магнитных полей на электротехнический персонал определены уравнения регрессионных моделей в ЭПС. В работе применены теоретические методы исследования, метод индукции и конечных элементов. Также теоретические методы включают анализ нормативных документов по ограничению воздействия на персонал электромагнитных полей переменного тока частотой до 1 кГц, математическое моделирование распределения электрических и магнитных полей тяговой сети в электроподвижном составе переменного тока при их аддитивном воздействии на электротехнический персонал.

**Ключевые слова:** электрические поля, магнитные поля, нормирование, энергетические характеристики ЭМП, безопасность, электротехнический персонал, электроподвижной состав.

# DETERMINATION OF EQUATIONS OF REGRESSION MODELS BY ENERGY CHARACTERISTICS OF EMF IN ELECTRIC ROLLING STOCK

© The Author(s) 2024
**ZAKIROVA Alfiya Rezavanovna,** candidate of technical sciences,
associate professor of the Department of Technosphere Safety
*Ural State University of Railway Engineering*
*(66 Kolmogorova str., Yekaterinburg, 620034, Russia, e-mail: AZakirova@usurt.ru )*

**Abstract.** Electrical personnel servicing electric rolling stock (EPS) are exposed to additive effects of electric and magnetic fields. The question arises: how to evaluate such fields, how do they change in EPS? The solution to this problem can be the energy characteristics of EMF. Objective: to determine the patterns of change in the energy characteristics of EMF in the cabin of an electric rolling stock. To solve the problems, it was necessary to develop a computer program that allows simulating the energy characteristics of EMF in the cabin of an EPS; to determine the equations of regression models for the energy characteristics of EMF in EPS, when it is on a single-track line. For the first time, a program based on the energy characteristics of EMF has been developed. To predict the additive effects of electric and magnetic fields on electrical personnel, the equations of regression models in EPS have been determined. The work uses theoretical research methods, the induction method and finite elements. Also, theoretical methods include the analysis of regulatory documents on limiting the impact on personnel of electromagnetic fields of alternating current with a frequency of up to 1 kHz; mathematical modeling of the distribution of electric and magnetic fields of the traction network in AC electric rolling stock with their additive impact on electrical personnel.

**Keywords:** electric fields, magnetic fields, rationing, EMF energy characteristics, safety, electrical engineering personnel, electric rolling stock.

*Для цитирования: Закирова А.Р. Определение уравнений регрессионных моделей по энергетическим характеристикам электромагнитных полей в электроподвижном составе / А.Р. Закирова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 4(68). – С. 275-280. – EDN: QTOJSR.*

**Введение.** Инфраструктура систем тягового электроснабжения характеризуется многообразием технических средств (электрооборудование двухполюсного и однофазного тягового электроснабжения) с различными режимами работы и своей спецификой обслуживания. Электротехнический персонал попадает в зону аддитивного (совместного) воздействия электрического и магнитного влияния частотой до 1кГц с высокой вероятностью повреждения здоровья из-за профессионально обусловленных заболеваний [1-5]. В связи с отсутствием предельно допустимых уровней ПДУ [6] оценить условия труда рассматриваемого персонала по ЭМП до 1кГц (кроме 50 Гц) не представляется возможным. Их суммарное действие на персонал нормативными актами России в полной мере не учитывается. В отличие от радиочастотного диапазона, ни в международных, ни отечественных стандартах влияние энергии ЭМП на персонал никак не оценивается. Эта проблема является актуальной, многие ученые [7-11, 15-31] исследуют вопросы безопасности труда (электромагнитной безопасности) персонала. Однако оценка, контроль и нормирование ЭМП всего частотного диапазона до 1кГц, а также аддитивное воздействие электрических и магнитных полей, несмотря на ее очевидную научно-практическую актуальность и значимость, еще не проводились. Ученые для исследования электромагнитных полей вблизи контактной сети разрабатывают программы [13-14], которые в основном предназначены для моделирования систем электроснабжения железных дорог. Наша задача заключается в определении энергетических характеристик ЭМП в кабине ЭПС при разных моделях КС и рассмотрении этого вопроса с точки зрения электробезопасности персонала, что ранее не осуществлялось. Имеются публикации [32-33], в которых раскрывается эта проблема, но только в общем виде, без привязки к моделям КС. К энергетическим характеристикам ЭМП в области безопасности труда персонала относим [5]:

– среднесменную энергетическую нагрузку ЭМП – параметр ЭМП, оцениваемый в электротехнике так называемым вектором Умова-Пойнтинга, имеющим размерность ВА/м²;

– суточную дозу потенциальной энергии облучения ЭМП – количество падающей энергии излучения ЭМП на площадь тела человека за определенный период (сутки) облучения, выражается в ВА·ч [32];

– удельную суточную дозу потенциальной поглощенной энергии ЭМП – величина энергии электромагнитного поля, переданная человеку (тканям организма) за определенный период (сутки), определяемая с учетом массы тела человека, выражается в ВА•ч/кг [33].

**Методология.** Целью работы является определение закономерностей изменения энергетических характеристик ЭМП в кабине электроподвижного состава.

С помощью разработанной нами программы [12] и в зависимости от изменения характеристик контактной сети, длительности пребывания работника на рабочем месте, его антропометрических данных можно определить уровни суточной дозы потенциальной энергии облучения ЭМП и удельной суточной дозы потенциальной поглощенной энергии ЭМП, при нахождении персонала в любой точке кабины ЭПС, и построить уравнения регрессионных моделей.

Для определения закономерностей изменения энергетических характеристик электромагнитных полей в кабине электроподвижного состава использовался язык программирования *Python*. Программа моделирования энергетических характеристик ЭМП в кабине ЭПС [12] содержит:

– Импорт библиотек в *Python*.

– Формирование данных о нахождении персонала в ЭПС и его антропометрических данных.

– Ввод параметров контактной сети (КС) для однопутного участка.

– Формирование данных об электровозе.

– Ввод параметров для экрана.

– Составление таблиц данных, вывод параметров и расчет энергетических характеристик ЭМП.

На этапе формирования данных об электровозе указываются свойства материала и форма кабины ЭПС. При этом вводимые данные по допустимым токам в КС и величине зигзага контактного провода должны соответствовать величинам, указанным в распоряжении ОАО «РЖД» от 18.08.2021 №1812/р «О совершенствовании системы содержания объектов энергетического комплекса». Допустимый длительный ток (переменный), протекающий по контактному проводу (МФ – 100) не должен превышать 600 А, при его износе на 15% – 470 А, а при 30% – 390 А, по несущему тросу (ПБСМ-95) – 410 А, усиливающему проводу (АС-185) – 590 А; величина зигзага контактного провода (от ±100 до ±400 мм) выбирается в зависимости от радиуса кривой и длины пролета.

**Результаты.** В контактной сети электрических железных дорог однофазного переменного тока, кроме тока основной частоты 50 Гц, присутствуют нечетные гармоники, кратные основной частоте, т. е. гармоники с частотой 150, 250, 350, 450, 550, 650, 750 Гц. Вблизи КС создаются электрические и магнитные поля со спектром указанных частот. Эти поля воздействуют на электротехнический персонал, обслуживающий ЭПС. В разработанной нами программе для персонала, находящегося в кабине ЭПС, смоделированы среднесменные энергетические нагрузки ЭМП.

На основании полученных данных построены уравнения регрессионных моделей по суммарным энергетическим нагрузкам ЭМП [8], учитывающим весь спектр высших гармонических составляющих (рис. 1).

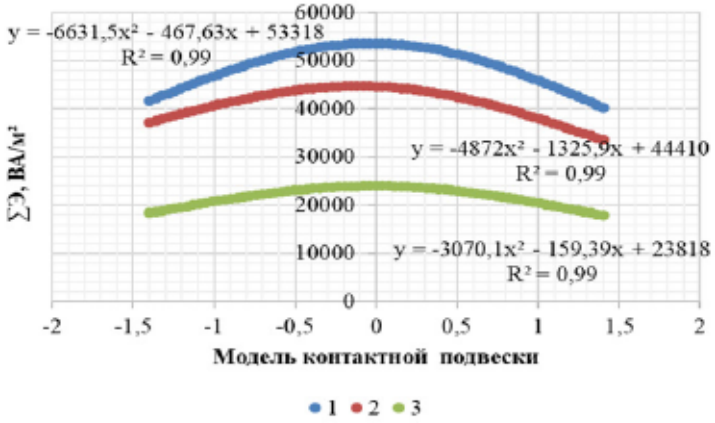



*Рисунок 1– Зависимость изменения суммарной энергетической нагрузки ЭМП в кабине ЭПС от модели контактной подвески: 1 – контактный провод, несущий трос, два рельса; 2 – контактный провод, несущий трос, два рельса и усиливающий провод; 3 – контактный провод, несущий трос, два рельса, усиливающий и экранирующий провода*

Из рисунка 1 следует, что суммарная среднесменная энергетическая нагрузка ЭМП [7] в кабине ЭПС в зависимости от модели контактной подвески изменяется по полиномиальной функции распределения (полином 2-й степени) с достоверностью аппроксимации 0,99. При одних и тех же технических характеристиках – токе и напряжении, но разных моделях КС однопутного участка – суммарная энергетическая нагрузка ЭМП [7] отличается. Максимальные уровни зафиксированы для модели с контактным проводом, несущим тросом, двумя рельсами, а минимальные – с экранирующим проводом. Соответственно, персоналу безопаснее находится в кабине ЭПС при его движении по модели КС под номером 3, в этом случае уровни среднесменной энергетической нагрузки ЭМП будут минимальны.

При движении ЭПС токоприемник скользит по контактному проводу (КП), его подвешивают зигзагом для равномерного изнашивания. Поэтому в работе исследовано изменение суммарной среднесменной энергетической нагрузки ЭМП от зигзага контактного провода ±400 мм (рис. 2).

В работе показано, что суммарная энергетическая нагрузка ЭМП [7] изменяется вместе с зигзагом КП, то есть смещается в ту же сторону, что и КП. Энергетическая нагрузка ЭМП [7] в кабине ЭПС имеет полиномиальное распределение (полином 2-й степени). В общем виде функция имеет следующий вид:

$y(x) = ax^2 + bx + c$,

где $a$, $b$ и $c$ – действительные числа, а $a \neq 0$.

Полученные теоретические зависимости изменения параметров низкочастотного ЭМП от режимов работы электроустановок, позволили определить дозы низкочастотного ЭМП, воздействующие на электротехнический персонал, и построить динамику их изменения от тока, потребляемого ЭПС (рис. 3).

Согласно рисунка 3 суточная доза потенциальной облученной энергии ЭМП [7] в кабине ЭПС имеет логарифмическую функцию распределения. Общий вид этой функции определяется по формуле:

$y(x)=a \cdot ln(x)+b$,

где $a$, $b$ – действительные числа, а $a \neq 0$.

Взаимосвязь удельной суточной дозы потенциальной поглощённой энергии ЭМП в кабине ЭПС и тока в КС [5, 7] приведена на рисунке 4.

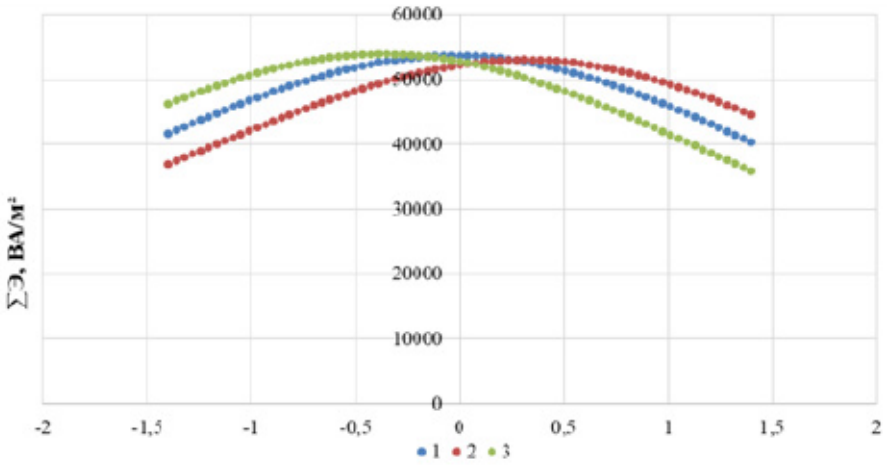



*Рисунок 2 – Изменение суммарной энергетической нагрузки ЭМП [4, 9] в кабине ЭПС в зависимости от величины зигзага контактного провода: 1– КП без смещения относительно НТ; 2 – со смещением КП (+0,4);3 – со смещением КП (-0,4)*

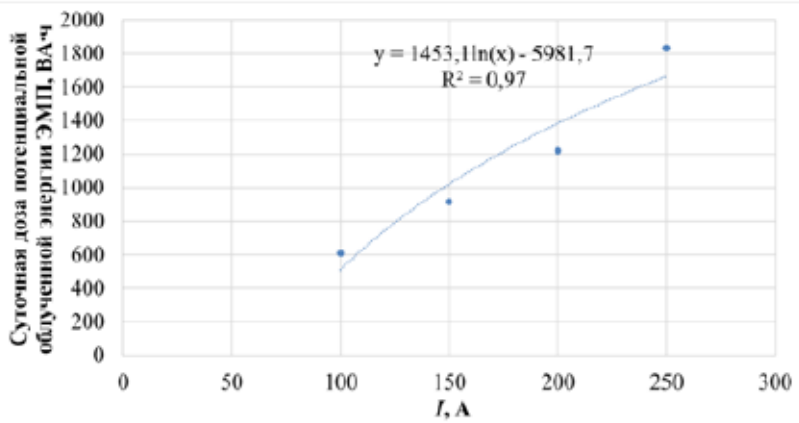



*Рисунок 3 – Динамика изменения суточной дозы потенциальной облученной энергии ЭМП от тока ЭПС*

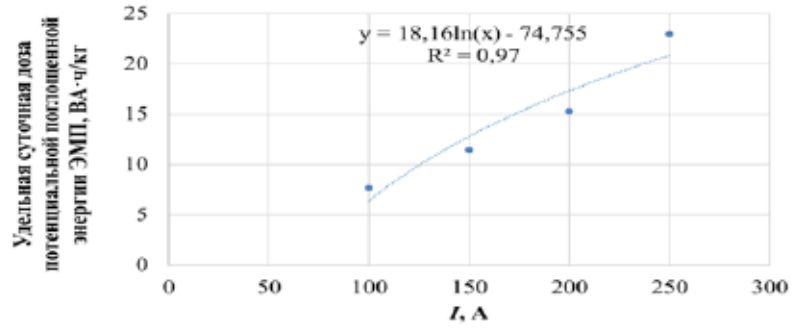



*Рисунок 4 – Взаимосвязь удельной суточной дозы потенциальной поглощённой энергии ЭМП в кабине ЭПС и тока в КС*

Корреляция удельной суточной дозы поглощённой энергии ЭМП (рис. 4) в кабине ЭПС имеет логарифмический закон функции распределения.

При увеличении тока в КС удельная суточная доза потенциальной облученной энергии и удельная суточная доза поглощённой энергии ЭМП в электроподвижном составе увеличивается не прямо пропорционально как, например, напряженность магнитного поля, а по логарифмической функции распределения, с достоверностью аппроксимации 0,97, что подтверждает возможность использования приведенных зависимостей. Эти данные необходимы для использования в дальнейшем при разработке системы защиты персонала.

**Обсуждение.** Очевидно, зная закономерности изменения энергетических характеристик ЭМП [7], еще на стадии проектирования контактной сети переменного тока можно спрогнозировать под какие уровни энергетических характеристик ЭМП попадет электротехнический персонал, что позволит оценить его условия труда по ЭМП. Ранее ученые исследовали электрические и магнитные поля вблизи КС и в ЭПС, но энергетические характеристики ЭМП в ЭПС рассматривались впервые.

**Выводы.** Разработана программа для моделирования энергетических характеристик ЭМП [7] относительно персонала, находящегося в кабине ЭПС. Получены функциональные зависимости изменения энергетических характеристик ЭМП в электроподвижном составе от величины тока и напряжения КС, потребляемого электровозом, А; эффективности экранирования суммарной энергетической нагрузки ЭМП.

Для машиниста (помощника машиниста) кузов электровоза можно считать экраном от элекромагнитных полей контактной сети. Рассмотрен случай, когда первая среда – воздух, а вторая – металл (сталь). Металлы по сравнению с проводящими диэлектриками имеют большую проводимость, и при условии идеальной проводимости второй среды преломленной волны не будет, а вся волна отразится с переменой знака. Мы получаем практически полное отражение от металлической поверхности, как от зеркала, и в первой среде от наложения падающей и отраженной волн получится стоячая волна. У поверхности отражения будут находиться узел электрического поля и пучность магнитного поля. Стоячие волны электрического и магнитного полей будут сдвинуты на четверть волны. Особенностью стоячей электромагнитной волны является обращение среднесменной энергетической нагрузки ЭМП (энергии) в нуль на стенках металла, энергия не переходит через её узлы.

При распространении электромагнитной волны в однородной среде и столкновении со средой с отличающимися электрическими свойствами, часть энергии поля отразится, а оставшаяся часть продолжит распространение в прежнем направлении.

Зная амплитуды падающей, отраженной и преломленной волн, можно определять распределение среднесменной энергетической нагрузки ЭМП.

Впервые на созданной математической модели определены закономерности изменения энергетических характеристик ЭМП [7] в ЭПС, которые позволяют учитывать специфику движения ЭПС и аддитивное воздействие электрических и магнитных полей на электротехнический персонал.

По рассматриваемым факторам с помощью полученных закономерностей можно спрогнозировать условия труда машинистов и их помощников, например, при строительстве магистрали, что позволит предупредить производственно обусловленные заболевания персонала [1-5].

Планируется исследовать энергетические характеристики ЭМП [7] в ЭПС при его движении по двухпутным и трехпутным участкам пути и разработать систему защиты электротехнического персонала.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Жидкова Е.А., Найговзина Н.Б., Калинин М.Р. Результаты анализа причин внезапной смерти среди работников локомотивных бригад // Кардиология. – 2019. – Т. 59, № 6. – С. 42-47.

2. Жидкова Е.А. Организационно-методические аспекты выявления факторов риска внезапной смерти и других сердечно-сосудистых рисков и их профилактика у работников локомотивных бригад: дис. … канд. мед. наук: 14.01.05 и 14.02.03 / Жидкова Елена Анатольевна – Москва, 2019. – 201 с.

3. Жидкова Е.А. Анализ причин внезапной смерти среди работников железных дорог Российской Федерации // Российский медико-биологический вестник имени академика И.П. Павлова. – 2022. – Т. 30, № 4. – С. 497-506.

4. Ширшов А.Б. Защита от вредного и опасного воздействия электромагнитных полей тяговой сети: дис. … канд. тех. наук: 05.26.01 // Ширшов Александр Борисович – Екатеринбург, 2006. – 104 с.

5. Закирова, А.Р. Защита электротехнического персонала тягового электроснабжения от вредного воздействия электромагнитных полей: дис. … канд. тех. наук: 05.26.01 / Закирова Альфия Резавановна. – Екатеринбург, 2013. – 160 с.

6. СаНПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. – URL:http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_129943/? (дата обращения: 04.02.23).

7. Закирова А.Р. Оценка аддитивного воздействия электрических и магнитных полей низкочастотного диапазона в производственных условиях // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 3 (39). – С. 106-116.

8. Закирова, А.Р. Исследование электромагнитных полей по энергетическим характеристикам ЭМП // Наука и техника транспорта. – 2022. – № 4. – С. 87-91.

9. Буякова Н.В., Крюков А.В., Суслов К.В., Середкин Д.А. Моделирование электромагнитных полей, создаваемых тяговыми сетями 25 кВ на многопутных участках // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2022. – Т. 14. – № 2 (54). – С. 3-14.

10. Буякова Н.В., Крюков А.В., Суслов К.В., Середкин Д.А. Фесак И.А. Моделирование электромагнитных полей трехфазной системы тягового электроснабжения // Известия Транссиба. – 2022. – № 1 (49). – С. 83-94.

11. Крюков А.В., Середкин Д.А. Моделирование электромагнитных полей трехфазных тяговых сетей с учетом гармонических искажений // В сборнике «Актуальные проблемы электроэнергетики. Сборник научно-технических статей. Нижний Новгород, 2022». – С. 160-165.

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024682706. Имитационное моделирование энергетических характеристик электромагнитных полей в кабине электроподвижного состава / А.Р. Закирова. – Дата поступления 19.07. 2024 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 26.09.2024 г.

13. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2024668329. Программный комплекс FAZONORD-AC_DC для расчетов режимов систем электроснабжения переменного и постоянного токов в фазных координатах с учетом движения поездов / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков. – Дата поступления – 22.07.2024. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 06.08.2024.

14. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2024664989. Программа для построения диаграмм энергетических балансов / К.В.Суслов, А.Е. Крюков, К.В Кенден, – Дата поступления -19.06.2024. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 26.06.2024.

15. Крюков А.В., Середкин Д.А., Ишина Т.В. Моделирование электромагнитных полей тяговых сетей постоянного тока // В сборнике «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием». Иркутск, 2024. – С. 182-187.

16. Воронина Е.В., Крюков А.В. Моделирование электромагнитных полей тяговых сетей 25 кВ с учетом жесткой поперечины // В сборнике «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием». Иркутск, 2024. – С. 71-76.

17. Воронина Е.В., Крюков А.В. Учет влияния опор при моделировании электромагнитных полей тяговых сетей магистральных железных дорог // В сборнике «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2023. Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции. Севастополь, 2023». – С. 339-343.

18. Титов Е.В. Автоматизация выбора защитных мероприятий по обеспечению электромагнитной безопасности / Е.В. Титов, А.А Сошников, И.Е Мигалёв // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2020. – № 5 (187). – С. 166-175.

19. Kosarev A.B., Kosarev B.I. Electromagnetic effect of an alternating current traction power supply system with a high-voltage power cord on electrical installations and networks of contraction consumers / E.B. Титов, A.A Сошников, Л.В. Куликова // Russian Electrical Engineering. – 2020. – Т. 91. – № 2. – С. 128-134.

20. Закирова А.Р. Концепция оценки аддитивного воздействия на персонал электрических и магнитных полей до 1 кГц // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 2 (42). – С. 87-93.

21. Кузнецов К.Б., Закирова А.Р. Аддитивное воздействие электрических и магнитных полей на электротехнический персонал // Безопасность труда в промышленности. – 2021. – № 4. – С. 27-31.

22. Suslov K., Kryukov A., Ilyushin P., Kryukov A., Shepovalova O. Modeling of modes of traction power supply systems equipped with renewable energy sources // Energy Reports. – 2023. – Т. 9. – № S9. – С. 447-461.

23. Bulatov Yu., Kryukov A., Suslov K. Effect of unbalanced and non-linear loads on operation of the turbogenerator of a distributed generation unit // Applied Sciences (Switzerland). – 2023. – Т. 13. – № 6. – С. 3643.

24. Kosarev A.B. Electromagnetic effect of an alternating current traction power supply system with a high-voltage power cord on electrical installations and networks of contraction consumers / A.B. Kosarev, B.I. Kosarev // Russian Electrical Engineering. – 2020. – Т. 91. – № 2. – С. 128-134.

25. Zakirova A.R. On Technogenic Impact of Electromagnetic Components of Rectified Current and Voltage on Environment / K. Kuznetsov, A. Zakirova // Lecture Notes in Electrical Engineering 641 LNEE. – 2020. – P. 444-451.

26. Zakirova A.R. Electromagnetic safety in transport engineering / Zakirova A.R., Lugaskova N.V., Kuznetsov K.B. // AIP Conference Proceedings. 2023. No. 2476. Paper 020047.

27. Suslov K., Kryukov A., Voronina E., Fesak I. Modeling power flows and electromagnetic fields induced by compact in-

duced by compact overhead lines feeding traction substations of mainline railroads // Applied Sciences (Switzerland). – 2023. – Т. 13. – № 7. – С. 4249.

28. Bulatov Yu., Kryukov A., Suslov K. Simulation of power router-based DC distribution systems with distributed generation and energy storage units // Energies. – 2023. – Т. 16. – № 1. – С. 214.

29. Suslov K., Kryukov A., Ilyushin P., Cherepanov A., Kryukov A. Modeling theeffects of electromagnetic interference from multi-wire traction networks on pipelines // Energies. – 2023. – Т. 16. – № 10. – С. 4188.

30. Kryukov A., Suslov K., Ilyushin P., Akhmetshin A. Parameter identification of asynchronous load nodes // Energies. – 2023. – Т. 16. – № 4. – С. 1893.

31. Kosarev A.B., Kosarev B.I. System of traction AC power supply with catenary supports not connected with a railway track // Russian Electrical Engineering. – 2019. – Т. 90. – № 6. – С. 421-427.

32. Закирова А.Р. Метод оценки условной вероятности воздействия на персонал энергетических характеристик ЭМП. Результаты современных научных исследований и разработок: сборник статей X Всероссийской научно-практической конференции. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». 2020. – С. 43-46.

33. Закирова А.Р., Сидоров А.И. Метод логико-вероятностного моделирования энергетических характеристик ЭМП, воздействующих на персонал // Безопасность жизнедеятельности. 2023. № 12 (276). – С. 21-26.

*Статья поступила в редакцию 20.10.2024*
*Статья принята к публикации 13.12.2024*

УДК: 551.577, 621.548
EDN: TFTHJQ

# АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНЦЕНТРАТОРОВ ВЛАГИ В ВОПРОСАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАЩИТЫ ЛОПАСТЕЙ ВЕТРОТУРБИН

© Автор(ы) 2024

SPIN: 4474-2957
AuthorID: 1191527
ORCID: 0009-0007-7611-8645
**ПЕТРОВ Антон Вячеславович,** аспирант, младший научный сотрудник лаборатории междисциплинарных проблем энергетики
*Ульяновский государственный технический университет*
*(432027, Россия, Ульяновск, улица Северный венец, 32, e-mail: an.petrov@ulstu.ru)*
SPIN: 7427-4601
AuthorID: 150790
ORCID: 0000-0002-1907-3790
ResearcherID: K-2314-2012
ScopusID: 57195268169
**КОВАЛЬНОГОВ Владислав Николаевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры «Тепловая и топливная энергетика»
*Ульяновский государственный технический университет*
*(432027, Россия, Ульяновск, улица Северный венец, 32, e-mail: kvn@ulstu.ru )*
SPIN: 1643-2038
AuthorID: 853538
ORCID: 0000-0003-3023-3393
ResearcherID: G-6402-2016
ScopusID: 57195260179
**ЧУКАЛИН Андрей Валентинович**, кандидат технических наук, доцент, кафедры «Тепловая и топливная энергетика»
*Ульяновский государственный технический университет*
*(432027, Россия, Ульяновск, улица Северный венец, 32, e-mail: chukalin.andrej@mail.ru )*
SPIN: 5554-1535
AuthorID: 558212
ORCID: 0000-0001-6541-2637
ResearcherID: AAF-1327-2021
ScopusID: 36183949700
**БУЗАЕВА Мария Владимировна**, доктор химических наук, доцент, кафедры «Химия и технологии композиционных материалов»
*Ульяновский государственный технический университет*
*(432027, Россия, Ульяновск, улица Северный венец, 32, e-mail: m.buzaeva@mail.ru )*

**Аннотация.** Основным фактором, влияющим на сохранение климата, является снижение выбросов углеродного следа в процессе производства энергии. Правительством многих стран приняты новые стратегии по развитию энергетического сектора, основной целью которых является изменение баланса генерации энергии и использование возобновляемых источников энергии как основных. Ветроэнергетика является наиболее эффективным и перспективным решением для энергетики будущего. В связи с чем управление метеорологическими явлениями в локальных областях атмосферного пограничного слоя в зоне расположения ветроэлектростанций, являются актуальными, так как от них в существенной мере будет зависеть эффективность и стабильность работы ветропарка, что будет сказываться на надежности энергетической системы регионов. Метеорологические явления могут оказывать значительное влияние на производительность и срок службы лопастей ветрогенераторов. В воздушной среде могут наблюдаться различные по агрегатному состоянию частицы (твердые, жидкие), которые, в зависимости от температуры, скорости ветра и ряда других факторов могут оказывать негативное влияние на работу ветряных электростанций. Осадки способны вызывать эрозию лопастей ветротурбин, тем самым снижая срок их службы и необходимость дорогостоящей утилизации, которая сводит на ноль всю эффективность их использования. Одним из способов устранения вышеуказанных проблем является активное воздействие на метеорологические явления, посредством искусственного управления осадками в зоне расположения ВЭС. В результате искусственного воздействия на облака концентраторами влаги самолетным или наземным методами, можно контролировать зоны выпадения осадков, увеличивать или уменьшать их количество. Основной целью работы является выявление, оценка и снижение отрицательного воздействия опасных метеорологических явлений, влияющих на работу ВЭС, путем разработки усовершенствованного способа искусственного управления осадками. Для выявления и оценки данных явлений используются три основных метода: наблю-

дения, эксперименты, методы математического моделирования. В работе представлен сравнительный анализ эффективности различных концентраторов влаги и способов их воздействия на процессы осадкообразования. Для принятия решения о целесообразности введения концентраторов влаги в определенное облако, проводится анализ ряда характеристик данной облачной структуры на основании метеорологических наблюдений и измерений. Проведены оценка и сравнение методов активного воздействия на гидрометеорологические процессы посредством искусственного управления осадками. Выявлена зависимость количества выпадающих осадков от строения облачных структур и концентрации вводимого реагента. Представлен подход по использованию предиктивной аналитики данных с метеостанций основанный на использовании нейросети. Также предложен подход по использованию беспилотных летательных аппаратов для засева облаков концентраторами влаги.

**Ключевые слова:** ветроэнергетические установки, атмосферный пограничный слой, концентраторы влаги, эрозия, лопасть, искусственный интеллект, реагент, метеорологические явления, осадкообразование, обледенение.

## ANALYSIS OF THE TECHNOLOGICAL EFFECTIVENESS OF MOISTURE CONCENTRATORS IN ENSURING THE PROTECTION OF WIND TURBINE BLADES

© The Author(s) 2024

**PETROV Anton Vyacheslavovich,** postgraduate student, Junior Researcher at the Laboratory of Interdisciplinary Problems of Energy
*Ulyanovsk State Technical University*
*(32 Severny Venets Street, Ulyanovsk, 432027, Russia, e-mail: an.petrov@ulstu.ru)*
**KOVALNOGOV Vladislav Nikolaevich**, doctor of Technical Sciences, professor, head of the Department of Thermal and Fuel Energy
*Ulyanovsk State Technical University*
*(32 Severny Venets Street, Ulyanovsk, 432027, Russia, e-mail: )*
**CHUKALIN Andrey Valentinovich,** candidate of Technical Sciences, associate professor Department of Thermal and Fuel Energy
*Ulyanovsk State Technical University*
*(32 Severny Venets Street, Ulyanovsk, 432027, Russia, e-mail: chukalin.andrej@mail.ru )*
**BUZAEVA Maria Vladimirovna,** doctor of Chemical Sciences, associate professor Department of Chemistry and Technology of Composite Materials,
*Ulyanovsk State Technical University*
*(32 Severny Venets Street, Ulyanovsk, 432027, Russia, e-mail: m.buzaeva@mail.ru )*

**Abstract.** The main factor influencing climate conservation is the reduction of carbon footprint emissions in the energy production process. The Government of many countries has adopted new strategies for the development of the energy sector, the main purpose of which is to change the balance of energy generation and the use of renewable energy sources as the main ones. Wind energy is the most efficient and promising solution for the energy of the future. In this connection, the management of meteorological phenomena in local areas of the atmospheric boundary layer in the area of wind power plants is relevant, since the efficiency and stability of the wind farm will significantly depend on them, which will affect the reliability of the energy system of the regions. Meteorological phenomena can have significant effects on the performance and service life of wind turbine blades. Particles of various aggregate states (solid, liquid) can be observed in the air, which, depending on temperature, wind speed and a number of other factors, can have a negative impact on the operation of wind farms. Precipitation can cause erosion of wind turbine blades, thereby reducing their service life and the need for expensive disposal, which nullifies all the efficiency of their use. One of the ways to eliminate the above problems is to actively influence meteorological phenomena through artificial precipitation management in the area of the wind farm location. As a result of artificial exposure to clouds with moisture concentrators by aircraft or ground methods, it is possible to control precipitation zones, increase or decrease their amount. The main purpose of the work is to identify, assess and reduce the negative impact of hazardous meteorological phenomena affecting the operation of wind farms by developing an improved method of artificial precipitation management. Three main methods are used to identify and evaluate these phenomena: observations, experiments, and mathematical modeling methods. The paper presents a comparative analysis of the effectiveness of various moisture concentrators and the ways they affect sedimentation processes. To make a decision on the expediency of introducing moisture concentrators into a certain cloud, an analysis of a number of characteristics of this cloud structure is carried out based on meteorological observations and measurements. The assessment and comparison of methods of active influence on hydrometeorological processes through artificial precipitation management was carried out. The dependence of the amount of precipitation on the structure of cloud structures and the concentration of the injected reagent was revealed. An approach to the use of predictive analytics of data from weather stations based on the use of a neural network is presented. An approach to the use of unmanned aerial vehicles for seeding clouds with moisture concentrators is also proposed.

**Keywords:** wind turbines, atmospheric boundary layer, moisture concentrators, erosion, blade, artificial intelligence, reagent, meteorological phenomena, precipitation, icing.

*Для цитирования: Петров А.В. Анализ технологической эффективности концентраторов влаги в вопросах обеспечения защиты лопастей ветротурбин / А.В. Петров, В.Н. Ковальногов, А.В. Чукалин, М.В. Бузаева // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 4(68). – С. 291-292. – EDN: TFTHJQ.*

**Введение.** Метеорологические явления с высокотурбулентным профилем скорости ветра и осадками в виде ледяных дождей, града препятствуют работе ветроэнергетических установок (ВЭУ). Одной из важнейших задач исследователей в области ветроэнергетики на сегодняшний день является решение проблемы «обледенения» и эрозии лопастей ветрогенераторов. Возможность искусственным путем воздействовать на процессы осадкообразования в зоне расположения ветроэлектростанций (ВЭС), позволит решить ряд проблем, связанных с неблагоприятным воздействием осадков на работу ветрогенераторов.

Возможность управления погодой — одна из важнейших задач современной науки и различных сфер жизнедеятельности, в частности ветроэнергетики. При решении задач управления климатическими условиями ученые сталкиваются с множеством сложностей, которые связаны со значительным разнообразием атмосферных процессов и специфическими особенностями тех сфер жизнедеятельности, в которых требуется достичь целей. Также следует учитывать, что процессы, происходящие в атмосфере настолько масштабны, что воздействия на них требуют огромных затрат энергии. Главным условием для возможности осуществления процесса управления осадками является существование неустойчивости в атмосфере при развитии физических процессов. При устойчивом состоянии атмосферы, процесс искусственного управления осадками потребует больших затрат энергии.

Уже незначительное воздействие на неустойчивую систему может спровоцировать самопроизвольный процесс, развивающийся за счет внутренних механизмов. В большей части облачных структур образование частиц осадков происходит малоэффективно, при этом происходящие в облаках механизмы сгущения частиц и переход одного фазного состояния вещества в другое можно использовать в целях регулирования процессов облако- и осадкообразования в зависимости от решаемых задач [1-3].

При одинаковых температурах упругость насыщенных паров над частицами льда меньше, чем над частицами воды. Ледяные кристаллы, находящиеся в облаке при отрицательных температурах, начинают увеличиваться из-за разности упругости насыщения, так как часть капель воды переходит в твердое состояние. Достигнув определенного размера, они начинают падать под действием силы тяжести, продолжая расти в процессе падения за счет сгущения (коагуляции). В конечном итоге ледяные частицы выпадают на землю в виде дождя, снега или града в зависимости от температурного режима. [4,5]. В большинстве существующих облачных структур осадки не выпадают только потому, что в них нет достаточного количества кристаллов льда, которые способствуют их выпадению. Путем искусственного создания в облаках дополнительного количества таких кристаллов (засева облака) появится возможность увеличивать процессы осадкообразования. При введении в облако очень большого числа коагулирующих реагентов («перезасев» облака) можно понизить интенсивность осадкообразования. При засеве облаков очень важно учитывать их физические параметры на момент воздействия, количество вводимого реагента и объем облака. При отклонении от технологии засева, и воздействии на типы облачных структур, потенциально не являющихся осадкообразующими, эффективность данной процедуры снижается до нецелесообразного уровня.

В настоящее время существует множество веществ, которые могут использоваться в качестве концентраторов влаги (реагентов) для искусственного управления осадками (ИУО) в облачных структурах. По механизму образования ледяных частиц их можно разделить на два основных класса: хладреагенты (вещества, которые понижают температуру облачной среды, что приводит к образованию ледяных кристаллов) и льдообразующие реагенты (вещества, которые создают ледяные кристаллы непосредственно на своих аэрозольных частицах в переохлажденной облачной среде). Кроме того, иногда применяются менее распространенные гигроскопические и грубодисперсные реагенты.

*1. Хладреагенты.* Льдообразующая эффективность хладреагентов тщательно изучена как в лабораторных, так и в натурных условиях. Наиболее эффективными из них являются твердая углекислота и жидкий азот. Эти вещества широко применяются на практике в качестве реагентов для искусственного управления осадками. Для этих хладреагентов разработаны самолетные и наземные технические средства для их введения в атмосферу и выявлена их максимальная эффективность [6-8].

Углекислота $CO_2$ является одним из первых хладреагентов, который был использован в качестве реагента для засева облачности. Углекислота, за счет низкой температуры испарения –78,9 °С, способствует сильному переохлаждению насыщенного пара и дальнейшему образованию мелких частиц льда. Засев облаков твердой углекислотой, как правило, выполняется с применением специальных дози-

рующих установок и технических устройств. В СССР активно заниматься вопросами исследования искусственного рассеяния облачности и туманов начали в 40-ых годах под руководством И.И. Гайворонского. Уже к 1954 г. были проведены различные опыты, которые позволили значительно продвинуться в понимании механизмов образования ледяных частиц с помощью хладреагентов. В частности, были проведены опыты по опробованию и проверке метода при различных метеоусловиях в разных регионах страны [9]. В качестве хладореагентов применялась не только углекислота, альтернативой твердой углекислоте с успехом использовался жидкий азот, температурный порог действия которого соответствует -0,5 °С. Применение жидкого азота $N_2$ в целях ИУО основывается на том же принципе, на котором основано применение углекислоты. Однако жидкий азот не нашел широкого применения на практике из-за того, что в результате его применения создаются небольшие зоны льдообразования в сравнении с углекислотой, что делает его менее эффективным [10].

*2. Льдообразующие реагенты.* Льдообразующие реагенты могут быть как неорганического, так и органического происхождения [11, 12]. В ходе исследований неорганических ИУО наиболее эффективным веществом для льдообразования является соединение – йодистое серебро (*AgI*) [13]. Среди органических соединений наиболее эффективным оказался флороглюцин [14]. Однако, он не нашел широкого применения из-за сложности получения. В настоящее время йодистое серебро является наиболее распространенным реагентом для рассеивания облачности. Это связано с тем, что кристаллическая структура *AgI* очень похожа на структуру естественного льда, что делает его частицы такими же эффективными центрами кристаллизации, как и ледяные частицы.

Введение аэрозоля йодистого серебра в облака в основном производится самолетными средствами, также возможно применение наземных технических средств, но они являются менее эффективными в использовании. При использовании самолетных средств воздействие может осуществляться двумя способами:

1) диспергированием реагента с применением пиротехнических элементов;

2) сброс с самолета в верхнюю часть облака горящих пиропатронов, содержащих *AgI*.

При воздействии с земли засев облаков может осуществляться либо с помощью наземных генераторов [15, 16], либо с помощью ракет и снарядов, содержащих *AgI* в качестве активного реагента.

*3. Гигроскопические реагенты.* ИУО может выполняться с помощью гигроскопических реагентов, представляющих собой капли растворов гигроскопических веществ (*NaCl*), образующихся при горении пиротехнических составов. Большое количество исследований в вопросах изучения эффективности гигроскопических реагентов проведено южно-африканскими и индонезийскими учеными. Вводимые в атмосферу гигроскопические частицы способны осаждать капли воды за счет имеющейся на них тонкой пленки водного раствора, вокруг которой снижается упругость пара. Технические средства, применяемые для засева облаков данным методом, аналогичны устройствам, используемым для засева облаков льдообразующими реагентами и хладреагентами [18].

*4. Грубодисперсные реагенты.* Для подавления или разрушения конвективной облачности и зон конвекции могут применяться грубодисперсные порошкообразные реагенты. Исследования показали, что эффективность таких концентраторов влаги зависит от состава порошка, размера частиц и их гидрофильности. Оптимальная дисперсность порошка, при которой достигается наибольшая эффективность, составляет около 2500-3000 см$^2$/г с размером частиц 4-5 мкм. Наиболее подходящим материалом является обычный строительный цемент. Также могут использоваться диатомит, белая глина, песок и оксид меди. Для введения порошкообразного реагента в облака используются специальные упаковки, которые сбрасываются с самолета. [19].

Применение грубодисперсных частиц (цемент, тальк, корунд и др.) в качестве реагента основано на создании в атмосфере движений обратных направлению развития конвекции [20]. Во время термической нестабильности атмосферы, создание таких движений может привести к разрушению облака. Во второй половине прошлого века были проведены многочисленные исследования по подавлению облачности. Через некоторое время после введения порошка наблюдалось снижение верхней границы облака, также опыты подтвердили, что эффективность процесса распада облака напрямую зависит от уровня неустойчивости в атмосфере. Механизм подавления облачности грубодисперсными порошками происходит следующим образом. Частицы реагента, приобретая скорость при падении, вовлекают за собой часть воздуха. Таким образом, конвективные движения начинают ослабевать. Частицы по ходу своего движения укрупняются за счет коагуляции. В опускающихся потоках за счет адиабатического нагревания воздуха происходит процесс испарения и уменьшение относительной влажности. Потоки, затрачивая часть энергии на испарение, охлаждаются, и в облаке начинают развиваться процессы, способствующие его рассеиванию. Грубодисперсные порошки в настоящее время в основном используются при охране лесов от пожаров для подавления грозовой активности конвективных облаков.

Помимо «традиционных» технологий засева в последние годы все чаще прибегают к альтернативным технологиям ИУО, к ним относятся ионизация, лазерные технологии и акустические волны. Все вышеперечисленные методы имеют одно

важное отличие – процесс активного воздействия на облачность производится без дополнительных реагентов. В частности, наиболее распространенный среди вышеперечисленных методов – метод ионизации облачности, заключающийся в создании заряженных частиц в облаках, которые в дальнейшем становятся центрами кристаллизации.

Актуальность данной работы состоит в нахождении наиболее эффективного концентратора влаги и наиболее экономически целесообразного способа внедрения данного концентратора в атмосферу для решения задач ИУО в зоне расположения ВЭС. На сегодняшний день существует много информации по использованию различных концентраторов влаги в целях сохранения урожая, тушения пожаров и др., при этом отсутствует информация по применению методов управления осадками в ветроэнергетической отрасли. Выше были представлены основные существующие на данный момент виды концентраторов влаги для искусственного управления осадками. Следует отметить что, применение реагентов для различных целей и в разных сферах деятельности может иметь свои особенности. Кроме того, для разных отраслей жизнедеятельности могут отличаться и методы введения реагентов. В некоторых случаях, например, для тушения лесных пожаров или защиты сельскохозяйственных угодий, экономически целесообразно вносить реагенты в атмосферу самолетным методом, в случае с ветроэнергетической отраслью, возможность применения такого метода будет напрямую зависеть от генерируемой мощности ВЭС и климатических условий для определенной местности. В большинстве случаев экономический эффект при применении самолетной техники в данной отрасли не будет оправдан, поэтому в данной работе нами был предложен метод использования БПЛА для доставки химически активных реагентов в атмосферу и подход к предварительной оценке метеорологических явлений с использованием нейронной сети.

Целью работы является оценка и сравнение методов активного воздействия на гидрометеорологические процессы посредством искусственного управления осадками, выявление зависимости количества выпадающих осадков от строения облачных структур и концентрации вводимого реагента. Анализ и оценка влияния различных концентраторов влаги на процессы осадкообразования, сравнение их эффективности. Выявление, оценка и снижение отрицательного воздействия опасных метеорологических явлений, влияющих на работу ВЭС, путем разработки усовершенствованного метода искусственного управления осадками.

**Методология.** Для выявления и оценки опасных метеорологических явлений в зоне расположения ВЭС используются три основных метода: наблюдения, эксперименты, методы математического моделирования.

Наблюдения проводятся на метеорологических станциях и включают в себя измерения и определение основных характеристик наиболее значимых атмосферных явлений. Для определения параметров используются измерительные приборы, расположенные на наземных станциях, судах или летательных аппаратах. В некоторых случаях целесообразно оборудование специальных метеорологических площадок. В целях выявления и оценки потенциально опасных метеорологических явлений в зоне расположения ветропарков, в первую очередь, проводятся наблюдения за изменением скорости и направления ветра. Также проводятся наблюдения за облачностью, заключающиеся в определении количества, формы, типов и высоты облаков.

Экспериментальный метод заключается в проведении опытов по рассеиванию облачности в естественных и лабораторных условиях, проведение измерений скорости ветра и количества выпадающих осадков с использованием различных приборов как на этапе предпроектных работ, так и во время эксплуатации ВЭС.

В связи с развитием информационных технологий и нейронных сетей, а также ростом компьютерных мощностей, наиболее актуальными на сегодняшний день являются методы математического моделирования атмосферных явлений. При работе с большими массивами данных по погодным условиям, для выявления закономерностей протекания процессов в атмосфере и оценки опасных метеорологических явлений используются статистические методы. Для изучения структуры и поведения атмосферного пограничного слоя, вихревых течений и многофазных сред в зоне расположения ветропарков, используются физико-математические методы. Использование математических методов позволяет создавать сложные модели процессов, происходящих в пограничном слое атмосферы, в виде дифференциальных уравнений. Подставляя исходные данные в эти уравнения, количественно выявляются закономерности атмосферных процессов, и прогнозируется их дальнейшее развитие.

Современные высокоточные метеостанции позволяют собирать данные, характеризующие погодные условия, отображать их в режиме реального времени и накапливать базу данных. Эти данные используются для обучения нейросетей на больших наборах данных, что позволяет прогнозировать неблагоприятные метеорологические явления, влияющие на режимы работы ветропарков.

На сегодняшний день разработаны и исследованы различные методы ИУО. Как правило, эти методы основываются на введении в облака концентраторов влаги, которые сбрасываются с самолетов, оборудованных соответствующими устройствами и приборами.

Для эффективного применения концентраторов влаги с целью искусственного управления осадками необходимо выполнение следующих условий:

– наличие в атмосфере облаков определенных видов;

– наличие в облаках зон с определенной температурой, которая не должна превышать температурный порог активности реагентов;

– направление и скорость ветра, для прогнозирования выпадения осадков.

Для принятия решения о целесообразности введения концентраторов влаги в определенное облако, необходимо провести анализ ряда характеристик данной облачной структуры на основании метеорологических наблюдений и измерений. Определяется фазовое состояние переохлажденной части облака; высоты верхней и нижней его границы; температура, влажность и водность на разных его высотах; геометрические параметры радиоэха. По результатам анализа принимается решение о целесообразности активного воздействия реагентами на данное облако.

При этом возможно применение двух способов измерений и оценки параметров атмосферы в целях обоснования применения методов искусственного управления осадками: прямые измерения, проводимые непосредственно с летательных аппаратов и дистанционное зондирование, осуществляемое при помощи радиометров и радиолокационных станций. Прямые измерения позволяют непосредственно измерять основные параметры, характеризующие свойства облаков. Дистанционное зондирование основано на моделировании оптических характеристик облачных частиц путем разработки алгоритмов и численных моделей на основании данных, получаемых со спутников и радиолокационных станций. Проводимые измерения дают необходимую информацию о высоте и оптической плотности облаков, их фазовом состоянии и водосодержании, о размерах облачных частиц и количестве осадков. На основании данных параметров проводится анализ различных облаков на возможность и эффективность применения методов активного воздействия, выявляются определенные зависимости.

В зависимости от достигаемых целей применяются три основных метода управления осадками: засев, перезасев и динамическое разрушение облачности.

Метод перезасева облаков заключается в том, что количество кристаллообразующих ядер, вводимых в облако, значительно превышает нормы засева, задачей которого сводится к увеличению осадкообразования. В результате перезасева каждая из ледяных частиц коагулирует меньшую часть влаги в облаке из-за чрезмерно большого их количества, поэтому частицы не достигают тех размеров, при которых должно начаться их падение под действием сил тяжести.

В настоящее время известно два способа динамического разрушению облачности: применение грубодисперсных порошков (чаще всего цемента); применение летательных аппаратов (самолеты, вертолеты). Все представленные методы управления осадками реализуются с использованием самолетной техники [20].

С целью снижения затрат на управление осадками предложен метод, который заключается в использовании беспилотных летальных аппаратов (БПЛА) для доставки химических реагентов в заданную точку атмосферного пограничного слоя. Использование данного метода внесения химического реагента позволит автоматизировать процесс искусственного управления осадками в зоне расположения ВЭС, а также повысить производительность и точность проводимой технологической операции при низкой себестоимости. С помощью ионных генераторов планируется создание конвективного тока в атмосфере и ионизации воздушной смеси облаков. В качестве устройства для внесения в атмосферный пограничный слой льдообразующего состава предложен специальный усовершенствованный пиропатрон, который может быть использован на БПЛА, и крепится к его крылу. К преимуществам такого пиропатрона можно отнести возможность многоразового использования корпуса безгильзового реактивного снаряда, а также возможность использования реактивной силы снаряда для увеличения дальности полета. Применение БПЛА может быть реализовано на автоматизированных станциях, которые располагаются вокруг ветропарка на расстоянии до 500 километров, для возможности доставки химических реагентов в атмосферный пограничный слой со всех сторон ветропарка, рисунок 1.

Количество автоматизированных станций может варьироваться от 4 до 12 штук в зависимости от метеорологических условий местности и рельефа. Расстояние между ветропарком и станциями определяется исходя из местных метеорологических условий и оценки эффективности управления метеорологическими явлениями. Автоматизированные станции управляются из диспетчерского центра, на котором используется система искусственного интеллекта позволяющая прогнозировать и классифицировать неблагоприятные погодные явления. Зона работы БПЛА охватывает расстояние между автоматизированными станциями для возможности их аварийной посадки при опасных метеорологических явлениях (шквалистый ветер, ураганы) и разрядке батарей.

Система искусственного интеллекта будет играть решающую роль в прогнозировании метеорологических явлений в зоне ветропарка и управлении автоматизированными станциями, из которых будет осуществляться запуск БПЛА для введения концентраторов влаги в атмосферу. Для анализа и прогнозирования метеорологических условий в районе ветропарка будет применена разработанная математическая модель. Эта модель была оптимизирована в процессе обучения для выполнения задач прогнозирования на основе

данных с метеорологических станций, включая как количественные (температура, давление, влажность, направление и скорость ветра), так и категориальные (наличие или отсутствие обледенения ветротурбин) показатели.

В нашем исследовании для построения нейронных сетей различной сложности используется система *Statistica*, которая и позволяет эффективно их создавать для решения задач регрессии и классификации и имеет удобный интерфейс.

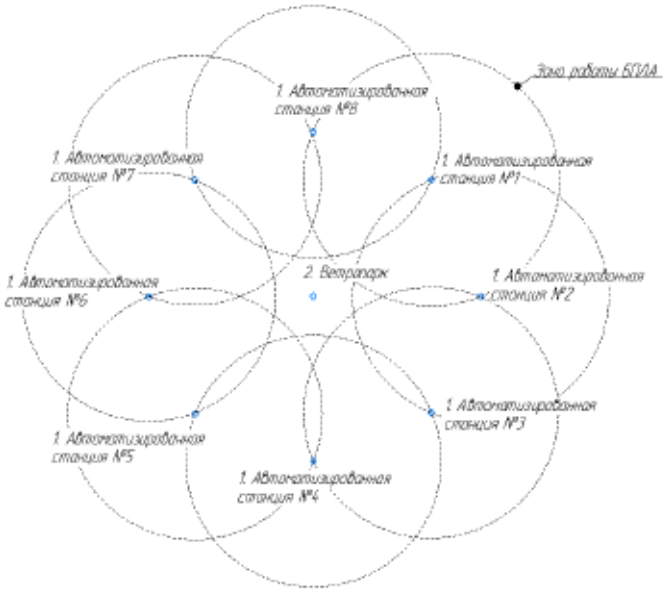



*Рисунок 1 – Зона управления метеорологическими явлениями в области ветропарка*

Разработанные методы и подходы прогнозирования позволят классифицировать осадки и интегрировать их в аналитический модуль для автоматического принятия решений по применению управляющих воздействий (введение реагента) для защиты ветропарков.

**Результаты.** Проведена оценка неблагоприятных метеорологических явлений, которые могут нарушить работу ВЭС и скорректировать графики нагрузки. Выделены следующие метеорологические явления:

1. Очень сильный ветер, шквал. При достижении скорости ветра во время порывов не менее 25 м/с, или средней скорости не менее 20 м/с (35 м/с и 30 м/с соответственно для горных районов и побережий морей). Происходит критическая нагрузка на лопасти, производится аварийное отключение ВЭС.

2. Ураганный ветер. Ветер, при достижении скорости 33 м/с и более оказывает критическую нагрузку на лопасти, мачту, соединительные части. Требуется аварийное отключение и внеплановая проверка ветроустановок.

3. Крупный град. При выпадении града диаметром 20 мм и более возможно возникновение глубокой эрозии поверхности хаба и лопастей ветротурбины.

4. Сильная песчаная буря. При переносе песка или пыли сильным (не менее 15 м/с) ветром и метеорологической дальностью видимости не более 500 м продолжительностью не менее 12 часов возможно появление эрозии поверхностей лопастей ветротурбины.

5. Сильное гололедно-изморозевое отложение. При появлении гололеда – толщиной более 5 мм может происходить разбалансировка ротора, вибрация, гололедное повреждение, эрозия поверхности лопастей.

6. Сильный мороз/жара. Если в соответствующие периоды в течение 5 дней и более значение среднесуточной температуры воздуха ниже/выше климатической нормы на 7°С и более, возможна деградация композитных материалов (лопастей) и снижение срока их службы [21, 22].

7. Дождь, ледяной дождь. В результате длительного дождевого воздействия на передние кромки лопастей ветротурбин, возможно появление дождевой эрозии на поверхности лопастей. Данный вид эрозии недооценен и менее изучен.

Проблема эрозии из-за воздействия капель воды уже очень давно является серьёзной проблемой не только для ветроэнергетики, но и для других отраслей промышленности, и она продолжает возникать везде, где вращающиеся детали движутся с высокой скоростью в жидкокапельной среде. Наибольшее распространение данный тип эрозии имеет на рабочих лопатках турбин в энергетической промышленности. В последнее время, по мере увеличения размера лопастей ветряных турбин, а как следствие и окружной скорости вращения концов лопастей, эрозия их передней кромки из-за воздействия дождевых капель стала довольно серьёзной проблемой. Данный тип разрушения приводит к значительному изменению аэродинамической структуры лопастей турбин, снижению эффективности и сокращению годовой

выработки энергии. Дождевая эрозия возникает по причине суммирования скоростей свободного падения капли и скорости вращения лопастей, в момент удара о переднюю кромку лопасти скорость может достигать значений 250-300 км/ч. При этом данное воздействие приходится на довольно малую площадь, поэтому в момент удара возникает сильное давление на кромку лопасти (25-30 атмосфер). По большому счету лопасть в момент выпадения дождя подвергается серии микрогидроударов [23, 24].

Исследования показывают, что дождевая эрозия была сильно недооценена и лопасти могут потребовать замены гораздо раньше их заявленного срока службы. В связи с быстрым ростом парка ветрогенераторов и актуализацией вопросов энергоэффективности, эксплуатирующие организации всерьёз озаботились данной проблемой [25-27].

Уже предлагаются решения различной степени эффективности. Масштабные исследования ведутся в области применения защитных покрытий на поверхностях лопастях, изучаются вопросы, связанные с оценкой эффективности подачи на лопасти сжатого воздуха [28-30].

Однако самые серьезные повреждения на лопастях может вызвать град. Также стоит отметить, что ситуация может быть осложнена фазовыми переходами и осаждением частиц на лопастях, как например, происходит во время возникновения дождя при отрицательной температуре или во время частого перехода температуры через ноль. Обледенение лопастей ветротурбин также отрицательно сказывается на работе ветрогенераторов, вызывая его разбалансировку и сокращая при этом срок их службы [31-33].

В данной статье нами предложен метод искусственного управления осадками в зоне расположения ВЭС. В результате искусственного воздействия на облака концентраторами влаги планируется контролировать зоны выпадения градов для защиты лопастей от эрозии, а также перераспределять зоны выпадения дождей в периоды перехода температуры через ноль и возможного образования ледяных наростов.

В данной статье произведена классификация различных концентраторов влаги по способу их воздействия на процессы связанные с управлением погодой, исследованы методы их введения в атмосферу. Оценена эффективность использования различных реагентов для засева, «перезасева» и разрушения облачности. Изучены свойства и эффективность применяемых на данный момент реагентов.

Принцип действия хладогентов основан на их испарении и создании сильного охлаждения внутри облака. За время испарения 1 г твердой углекислоты генерируется 1011 ледяных частиц. При этом температурный порог активности твердой углекислоты равен –3… – 4 °С. В настоящее время твердая углекислота используется в основном в виде гранул диаметром 8-10 мм и длиной 10-30 мм.

Количество образующихся ледяных частиц йодистого серебра *AgI* зависит от температуры и количества вводимого реагента. Температурный порог активности для йодистого серебра равен 4-6°С. Засев облаков производится с самолетов с помощью специально разработанных пиротехнических патронов. Льдообразующая активность пиросоставов $5x10^{12}$ ядер на 1 г при температуре –10°С. Один пиропатрон в среднем содержит 30-50 г пиросостава [34].

Введение грубодисперсного аэрозоля нерастворимых веществ в неустойчиво стратифицированное облако создает условия для развития коагуляции. Взаимодействие частиц реагента с облачными элементами приводит к образованию значительного числа крупных частиц (в 10 кг реагента содержится $10^{13}$-$10^{14}$ частиц с размерами от 5 до 80 мкм). Для создания нисходящего потока в конвективных облаках высотой от 5 до 12 км требуется от 10 до 100 кг грубодисперсного и высокодисперсного порошкообразного реагента.

Одним из основополагающих моментов, во многом определяющих проведение процедуры ИУО является выбор облаков. Естественные осадки дают облака типа *Ns* (слоисто-дождевые) – *As* (высокослоистые) при температуре -4°С и ниже и толщиной от 100 м. Облака типов *Sc* (слоисто-кучевые), *St* (слоистые), *Ac* (высококучевые) не дают осадки, но могут быть использованы для засева с целью осадкообразования, если имеют температуру -4°С и достаточное для запуска процесса количество влаги. При этом их толщина должна быть не менее 500 м.

Так увеличение осадков при засеве отмечается только в том случае, если он совпадает с периодом развития облачной области с устойчивым восходящим потоком. Засев облака может привести к противоположному эффекту при диссипации облачной ячейки.

В результате изучения облачных структур и проведения различных экспериментов по рассеянию облачности, было выявлено, что имеет смысл воздействовать только на облака *Ns–As* при их толщине более 500-700 м и водозапасе более 100 г/м² [35-38].

Водозапас облака можно определить с помощью формулы

$$q = W\Delta H, \quad (1)$$

где $W$ – водность, г/м³, а $\Delta H$ – толщина (мощность) облачного слоя, м.

Количество выпавших осадков, $Q$, мм, при соответствующих начальных размерах капель $r_0$ и мощности облачного слоя $\Delta H$, определяется численным методом по формуле

$$Q = \frac{4}{3}(\pi\rho_{H2O}r_k^3 N), \quad (2)$$

где $\rho H_2O$ – плотность воды, $\Delta H$ – мощность об-

лака, т.е. разность между высотами верхней и нижней границ конвективного облака; $r_k$ – радиус капли при выпадении ее из облака, мкм; $N$ – количество частиц реагента, приходящегося на 1 см² площади облака [39]. Зависимость количества осадков от концентрации реагента представлена на рисунке 2.

Согласно представленной зависимости, количество осадков начинает линейно увеличивается при повышении концентрации вводимого реагента до достижения определенного уровня, затем наблюдается замедление роста количества выпадающих осадков, это связано с тем, что дальнейшее увеличение концентрации реагента начинает влиять на рост капель. Также количество выпадающих осадков увеличивается с ростом такого параметра как мощность облака.

Для доставки реагентов в облака в настоящее время, как правило, применяются специально разработанные самолетные и наземные транспортные средства.

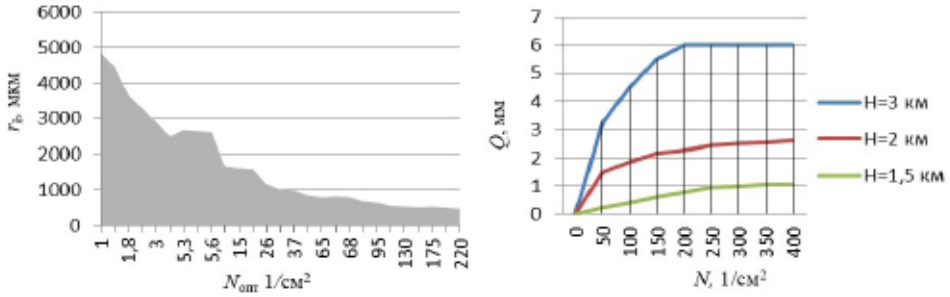



*Рисунок 2 – Зависимость количества осадков от концентрации вводимых частиц при разных размерах капель осадков из облака $r_k$ и при различной высоте нахождения облака H*




*Рисунок 3 – Неизмельченный состав йодистого серебра (AgI)*



*Рисунок 4 – Многофункциональный беспилотный комплекс «Орлан-10»*

В результате изучения различных видов реагентов по принципу действия, их эффективности, стоимости и способам введения в атмосферу было установлено, что применение пиропатронов с льдообразующими веществами, в частности йодида серебра, при помощи БПЛА с предварительной ионизацией воздушной среды ионными генераторами [40-42], является наиболее оптимальным и эффективным решением. Это обосновывается тем, что не потребуется длительная подготовка технических средств, содержание аэродрома и большого количества персонала. Помимо этого, количество вводимого в атмосферу йодида серебра для рассеивания облачности сравнительно мало с применением других типов общедоступных реагентов. Например, грубодисперсных порошков для активного воздействия на облака потребуется от 10 кг вещества и выше, транспортировку такого количества реагента будет сложноосуществимой задачей для БПЛА. На рисунке 3 представлен неизмельченный состав йодистого серебра.

Для осуществления наблюдений за метеорологической обстановкой и введения реагента для регулирования процессов осадкообразования в зоне расположения ВЭС предложено использование БПЛА «Орлан-10» (рис. 4), с дальностью действия до 600 км, способного нести пиропатрон с реагентом до 5 кг, также для БПЛА данного типа существует возможность установки оптико-электронных систем. Этих характеристик вполне достаточно для выполнения задач по оценке метеорологической обстановки и рассеивания облачности.

Для введения реагента в атмосферу было предложено устройство (Патент на полезную модель № 229240 от 30.09.2024), выполненное в виде реактивного снаряда и содержащее пироэлемент рисунок 5. Данное устройство повысит эффективность применения льдообразующих составов, будет способствовать увеличению дальности полетов беспилотных летальных аппаратов самолетного типа и даст возможность многоразового использования корпуса безгильзового реактивного снаряда.

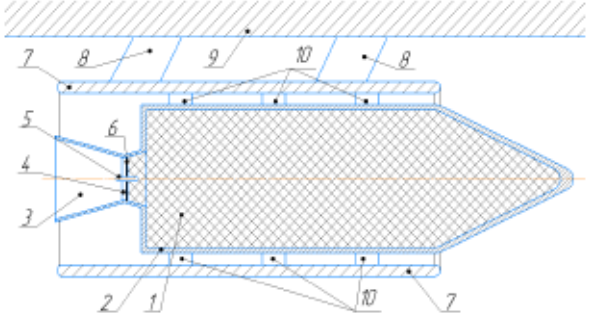



*Рисунок 5 – Устройство для внесения в атмосферный пограничный слой льдообразующего состава*

К крылу 9 беспилотного летательного аппарата самолетного типа 8 присоединен теплоизолированный защитный кожух 7, который соединен креплениями 10 с корпусом 2. Теплоизолированный защитный кожух 7 имеет аэродинамическую форму и предназначен для защиты поверхностей беспилотного летального аппарата от высоких температур. Между теплоизолированным защитным кожухом 7 и корпусом 2 имеется кольцевой канал, образованный креплениями 10, предназначенный для интенсивного охлаждения корпуса 2. В корпусе 2 с соплом 3 с критическим сечением 4 расположен пироэлемент 1, выполненный в виде реактивного снаряда с двигателем твердого топлива. Твердое топливо содержит льдообразующий состав (*AgI*). Беспилотный летательный аппарат самолетного типа управляется оператором и может производить активное введение льдообразующего состава по его команде. При получении команды происходит автоподжиг и возгорание сгораемого электрода 5, следом загорается сгораемый диэлектрик 6, данные объекты расположены в области критического сечения 4 сопла 3. Через некоторое время, воспламеняется пироэлемент 1, выполненный в виде реактивного снаряда с двигателем твердого топлива, которое содержит льдообразующий состав. В процессе активного движения беспилотного летательного аппарата самолетного типа, приобретаемого за счет реактивных сил сопла 3, образуется шлейф активного дыма, при взаимодействии которого с облачной средой формируется необходимый эффект осадкообразования.

Современные высокоточные метеостанции позволяют собирать данные о погодных условиях, отображать их в режиме реального времени и накапливать базу данных. Это позволяет обучать нейросети на большом наборе данных и прогнозировать неблагоприятные метеорологические явления, влияющие на работу ветропарков. Мы создали искусственную нейронную сеть. Произвели оценку количественных показателей метеообстановки (задача регрессии). В ходе обучения и оптимизации нейронной сети удалось достичь производительности на тестовой выборке до 0,99. При помощи данной нейросети, получающей данные по погодным условиям с 15 метеостанций, возможно производить прогнозирование осадков, которые в дальнейшем могут привести к эрозии либо обледенению лопастей ветротурбин и принимать решения по автоматизированному применению управляющих воздействий (введение инъекций концентраторов влаги) с целью защиты ветропарков [43].

**Обсуждение.** Эрозия передних кромок лопастей ветровой турбины – одна из наиболее распространённых проблем при эксплуатации ветровых энергетических установок (ВЭУ). Эрозия передних кромок лопастей происходит как от прямых так и от косых ударов различных частиц (рис. 6).

Это объясняется высокой скоростью вращения лопастей, создающей огромную нагрузку на их вершины, а также дополнительными физическими воздействиями (дождь, пыль, лёд, град, молнии, столкновения с насекомыми и птицами) (рис. 7).

На данный момент существуют различные решения для защиты лопастей от эрозии. Одним из наиболее распространенных решений является использование защитных пленок и покрытий, также уже был опробован способ устранения данной проблемы, заключающийся в подаче сжатого воздуха через сеть микроотверстий на поверхности лопасти. Для предотвращения появления повреждений на лопастях, которые могут усилить эрозию, необходимо также соблюдать правила их транспортировки и монтажа.

Метод активного воздействия на гидрометеорологические процессы уже на протяжении многих десятилетий успешно применяется для охраны сельскохозяйственных угодий от градобития и защиты лесных массивов от пожаров. Нами предложен усовершенствованный метод искусственного управления осадками в зоне расположения ВЭС. В результате искусственного управления осадками планируется контролировать зоны выпадения градов, а также дождей в периоды возможного перехода температуры через ноль, в целях защиты лопастей ветротурбин от возникновения эрозии и разбалансировки рабочего колеса ветрогенератора. Данные явления в природе происходят относительно редко, но при этом наносят самые основные и серьезные повреждения. В связи с этим применение ИУО в данном случае будет экономически оправдано и целесообразно.

Состояние атмосферного пограничного слоя сильно изменчиво, так как в развивающихся облаках постоянно происходят фазовые переходы. Чтобы ускорить процесс осадкообразования нужно создать оптимальное содержание кристаллических льдообразующих ядер в облаке. Концентрация ядер может быть определена либо эмпирически, либо путем численного моделирования микрофизических атмосферных процессов. Для предотвращения нежелательного выпадения осадков необходимо засеять развивающееся облако большим количеством льдообразующих ядер или мелких гигроскопических частиц. Также возможно применение технологий динамического разрушения облачности и технологий, связанных с ионизацией воздушной среды.

Предложенная в данной работе технология, в первую очередь, основана на необходимости проведения тщательного и своевременного анализа опасных природных явлений, которые потенциально могут возникнуть в зоне расположения ВЭС и впоследствии оказывать на них отрицательное воздействие. Технология предусматривает применение концентраторов влаги в качестве воздействия на процессы осадкообразования при помощи БПЛА в зоне расположения ветропарков. Решения по предварительному рассеиванию облачности будут

основаны на данных, полученных с метеостанций и сформированных при помощи оптимизированной искусственной сети. Применение данной технологии направлено на снижение вероятности образования эрозии в результате градобития и появления ледяных наростов на лопастях турбин и, как следствие, повышения срока службы ветрогенераторов. Главное отличие данной технологии от существующих заключается в комплексном применении БПЛА для введения пиропатронов с реагентами, искусственного интеллекта для сбора и анализа метеорологических данных и технологии предварительной ионизации воздушной среды наземными генераторами.

Такой комплексный подход позволит заблаговременно прогнозировать развитие облачности в зоне расположения ВЭС, оперативно реагировать на происходящие изменения в атмосфере и применять необходимые меры для засева облаков. В результате проведения нашего исследования выявлен наиболее подходящий для наших целей концентратор влаги, разработана схема работы и взаимодействия автоматизированных станций по сбору данных и полетам БПЛА. Оценка развития облачности и температурного режима при помощи разработанной нейросети, а также применение наземных ионных генераторов и модернизированных устройств (пиропатронов) для внесения в АПС льдообразующего состава позволят более точно и эффективно проводить мероприятия по искусственному управлению осадками в зоне расположения ВЭС.




*Рисунок 6 – Механизм образования эрозии на пластичной поверхности*



*Рисунок 7 – Эрозия лопастей ветротурбин*

**Выводы.** В данной статье была проведена оценка и сравнение методов активного воздействия на гидрометеорологические процессы посредством искусственного управления осадками, выявлена зависимость количества выпадающих осадков от строения облачных структур и концентрации вводимого реагента. Проведен сравнительный анализ эффективности различных концентраторов влаги и способов их воздействия на процессы осадкообразования, выявлен наиболее эффективный реагент для применения в сфере ветроэнергетики. Произведена оценка метеорологических явлений, отрицательно влияющих на генерацию энергии ветроэлектростанций и ведущих к их аварийному отключению. Предложен усовершенствованный метод искусственного управления осадками, для снижения отрицательного воздействия градобития и дождевого воздействия в условиях возможного образования ледяных наростов. Данный метод заключается в применении нейросети для оперативной обработки данных с метеостанций и использовании беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для доставки химических реагентов в заданную точку атмосферного пограничного слоя в целях автоматизации их внесения в атмосферу.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Шметер С.М. Термодинамика и физика конвективных облаков. – Л.: Гидрометеоиздат, 1987. – 287 с.
2. Качурин Л.Г. Физические основы воздействия на атмосферные процессы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1990. – 336 с.
3. Зыкова, Е.Х. Воздействие на атмосферные процессы и явления // Е.Х. Зыкова; М-во образования и науки Российской Федерации, Федеральное гос. бюджетное образовательное учреждение высш. образования "Забайкальский гос. ун-т". – Чита: Забайкальский гос. ун-т, 2016. – 117 с.
4. Bergeron T. On the physics of clouds and precipitation. // Proc. Conf. Int. Union Geodesy and Geophysics, Lisbon, 1933. – Part II. – P. 156-178.
5. Wegener A. Thermodynamik der Atmosphere. – Leipzig,

1911. – 311 p.
6. Баханов В.П. Генерация ледяных кристаллов хладореагентов для целей активных воздействий на переохлажденные облака и туманы // Обзор ВНИГМИ-МЦД, 1981. – 50 с.
7. Селектор Л.Г., Несмеянов П.А., Дьяченко Ю.Д., Дубинин Б.Н., Корнеев В.П., Арсланов Р.З. Пиротехнические составы и генераторы кристаллизующих аэрозолей для средств активного воздействия // Материалы юбилейн. конф. «Состояние и перспективы развития технологии и технических средств воздействия на гидрометеорологические процессы». – Чебоксары, 1999. – С. 69-72.
8. Langmuir I. Studies of the effects produced by dry ice seeding of stratus clouds. – Final Report Project Cirrus. – Gen. Electr. Res. Lab., 1948. – 135 p.
9. Гайворонский И.И. Об исследованиях, проведенных в Центральной аэрологической обсерватории в области искусственных воздействий на облака и туманы // Труды ЦАО. – 1959. – Вып. 26. – С. 39-55.
10. Литвинов И.В. Перераспределение осадков при воздействии на облака хладореагентами // Метеорология и гидрология. – 1967. – № 9. – С. 48-51.
11. Баханова Р.А. О механизме образования ледяных кристаллов на кристаллизующих реагентах // Обзор ВНИГМИ-МЦД, 1978. – 30 с.
12. Никандров В.Я. О взаимодействии переохлажденных водяных капель с твердыми частицами // Труды ГТО. – 1956. – Вып. 57.
13. Плауде Н.О., Соловьев А.Д. Льдообразующие аэрозоли для воздействия на облака. – Обзор ВНИГМИ-МЦД, 1979. – 82 с.
14. Громова Т. Н., Лядов В.С., Синкевич А.А., Сталевич Д.Д., Шумаков Л.И. Результаты опытов по воздействию на переохлажденные облака с использованием в качестве реагента флороглюцина // Труды Всесоюз. конф. по активным воздействиям, 1990. – Гидрометеоиздат. – С. 510-513.
15. Частухин А.В., Двоеглазов С.М., Ким Н.С., Корнеев В.П. Методические особенности оценки льдообразующей эффективности полноразмерных наземных аэрозольных генераторов // Наука. Инновации. Технологии. – 2019. – Вып. 4. – С. 129-136.
16. Павлюченко В.П. Создание искусственных восходящих потоков в атмосфере с помощью многоуровневого устройства // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2019. – №5. – С. 21-28.
17. U. Haryanto, R.D. Goenawan, D. Harsanti. Development of Hygroscopic Cloud Seeding Flare in Indonesia // 10 WMO Sci. Conf. on Weather Modification. – Bali Indonesia, 2011.
18. Баззаев Т.В., Владимиров С.А., Кочетов Н.М. и др. Способ укрупнения частиц гигроскопических реагентов, генерируемых пиротехническими изделиями для задач рассеяния теплых туманов // в: Всероссийская конференция по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. 08-10 сентября 2021 г. Сборник научных трудов. – Нальчик, 2021. – С. 302–307.
19. Беляев В.П., Зонтов Л.Б., Петров В.В. Исследование эволюции термодинамических параметров конвективных облаков при воздействии грубодисперсными порошками // Труды ЦАО. – 1984. – Вып. 156. – С. 23-32.
20. Беляев В.П., Зацепина Л.П., Зонтов Л.Б., Петров В.В., Серегин Ю.А. Некоторые результаты опытов по разрушению многоячейковых конвективных облаков // Труды ЦАО. – 1987. – В. 164. – С. 3-10.
21. Методические указания проведения работ по искусственному регулированию осадков из конвективных облаков самолетными средствами воздействия. – М: ЦАО, 1988. – 29 с.
22. Алексеева А.А. Особенности условий возникновения активной конвекции с сильными шквалами // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2019. – № 2(372). – С. 41-58.
23. Алексеева А.А. Способы оценки максимальной конвективной скорости в диагнозе и прогнозе опасных конвективных явлений погоды // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2020. – № 2(376). – С. 6-22.
24. Elhadi Ibrahim, M., and Medraj, M. Drip erosion of wind turbine blades: mechanics, testing, modeling and prospects for the future. Materials 13 (1). – 2013. – № 10. – P. 153.
25. Соломин Е.В., Долгошеев В.В., Васильев И.А. Противообледенительная система лопасти ВЭУ на основе ультразвукового излучения // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE). – 2015. – №5. – С. 19–23.
26. Wang, Y.; Xu, Y. An effect assessment and prediction method of ultrasonic de-icing for composite wind turbine blades// Renewable Energy. – 2018. – V. 118. – P. 1015-1023.
27. Зуев В.О., Двойнишников С.В., Рахманов В.В. Измерение геометрических параметров наледи методом фазовой триангуляции в ограниченном объеме с преломлением оптических сигналов // Теплофизика и аэромеханика. – 2023. – № 30. – С. 121-126.
28. Sareen, A.; Sapre, C.A.; Selig, M.S. Effects of leading-edge protection tape on wind turbine blade performance // Wind Eng. – 2012. – № 36. – P. 525-534.
29. Springer, G.S.; Yang, C.; Larsen, P.S. Analysis of rain erosion of coated materials. // J. Compos. Mater. – 1974. – № 8. – P. 229-252.
30. Cortés, E., Sánchez, F., O'Carroll, A., Madramany, B., Hardiman, M., Young, T.M. On the MaterialCharacterisation of Wind Turbine Blade Coatings: The Effect of Interphase Coating–Laminate Adhesion onRain Erosion Performance // Materials. – 2017. – № 10. – P. 11-46.
31. Li, D., Wang, K. and Li, Y. The effect of erosion of the leading edge of the blade on the aerodynamic characteristics of the wind turbine airfoil[J] // Trans. Chin. Soc. Agric. Eng. – 2017. – № 33. – P. 269-275.
32. Приходько А.А., Алексеенко С.В. Обледенение аэродинамических поверхностей: условия возникновения и методики расчета // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 6. – С. 37-47.
33. Амелюшкин И.А. Исследование двухфазных потоков в приложении к проблемам обледенения и аэрофизического эксперимента: дис. канд. физ.-мат. наук: 01.02.05. – Жуковский, 2014. – 144 с.
34. Ватиашвили М.Р. Изменение режима осадков в регионе Центрального Кавказа при проведении противоградовой защиты // Наука. Инновации. Технологии. – 2019. – №2. – С. 88-96.
35. Диневич Л.А., Диневич С.Е., Лесков Б.Н. Итоги экспериментов по увеличению дождя и снега из облаков различных типов // Современные наукоемкие технологии. – 2013. – № 1. – С. 64-87.
36. Абшаев М.Т. Анализ вариантов увеличения осадков на локальной территории // Труды ВГИ. – 2017. – Вып.100. – С. 76.
37. Невзоров А.Н. Биоморфизм и свойства жидкокапельной воды в холодных облаках // Сборник «Вопросы физики облаков. Памяти С.М. Шметера». – М: МиГ, 2008. – С. 268-298.
38. Берюлев Г.П., Данелян Б.Г. Искусственное увеличение количества осадков. Результаты исследований и оперативно-производственных работ // Метеорология и Гидрология. – 2021. – № 9. – С. 32-45.
39. РД 52.04.674-2006 "Руководство по искусственному вызыванию осадков для охраны лесов от пожаров" от 03.03.2006 // Росгидромет. – 2006.
40. Диневич Л.А., Ингель Л.Х., Хаин А. Оценки переноса льдообразующих частиц от наземных генераторов // Современные наукоемкие технологии. – 2013. – №2. – С. 14-26.
41. Шилин А.Г., Хучунаев Б.М. Возможности увеличения эффективности пиротехнических генераторов льдообразующего аэрозоля // Наука. Инновации. Технологии. – 2022. – № 1. – С. 87–110.
42. Шилин А.Г., Хучунаев Б.М. Особенности формирования льдообразующего аэрозоля, образованного при горении пиротехнического состава в тракте сопла Лаваля // Метеорология и гидрология. – 2022. – № 7. – С. 94-100.
43. Чукалин А.В., Ковальногов В.Н., Клячкин В.Н., Демидов Д.А., Петров А.В. Прогнозирование неблагоприятных метеорологических явлений в области ветропарка с использованием нейронных сетей // Экологические системы и приборы. – 2024. – №7.

***Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00030, https://rscf.ru/project/22-19-00030/.***

*Статья поступила в редакцию 04.11.2024*
*Статья принята к публикации 13.12.2024*

УДК 697.941
EDN: QWVFPC

# ПРОБЛЕМЫ ОБОГАЩЕНИЯ КИСЛОРОДОМ ВОЗДУХА ПОМЕЩЕНИЯ И УДАЛЕНИЯ ИЗ НЕГО УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА

© Автор(ы) 2024

ORCID: 0009-0002-5571-8557
**РАДИОНОВ Николай Владимирович**, преподаватель кафедры общей и прикладной физики, аспирант
*НИУ Московский государственный строительный университет*
*(129337, Россия, Москва, Ярославское шоссе, 26, e-mail: nradion1@gmail.com)*
SPIN: 7081-4490
AuthorID: 618456
ORCID: 0000-0002-1233-1304
**СЛУГИНОВА Наталья Ивановна,** кандидат сельскохозяйственных наук,
доцент кафедры «Технология и техносферная безопасность»
*Пензенский государственный технологический университет*
*(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11, e-mail: princess _ natalia@mail.ru)*
SPIN: 8528-4273
AuthorID: 517653
ORCID: 0000-0002-3490-4804
**КЛЕЙМЕНОВА Тамара Валерьевна,** кандидат сельскохозяйственных наук,
доцент кафедры «Технология и техносферная безопасность»
*Пензенский государственный технологический университет*
*(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11, e-mail: kleimenovatv@penzgtu.ru)*

**Аннотация.** В работе рассмотрена ситуация, когда функционирование системы механической вентиляции не может обеспечить помещение здания воздухом необходимого качества по причине экологически неблагоприятного состояния окружающей воздушной среды. Целью работы является показать возможные подходы к организации безопасного газового режима помещения в случае отказа от приточной вентиляции или при значительно менее интенсивном режиме её работы. Детально рассмотрено и выполнено сравнение характерных показателей концентрации углекислого газа в помещении, установленных строительными нормативными документами, со значениями из рекомендаций, полученных на основе гигиенических исследований. В работе даны рекомендации, каким образом из хорошо известных газовых законов можно прийти к величинам, которые будут использованы в данной работе для количественной оценки того или иного компонента воздуха. Приведены значения концентраций кислорода и углекислого газа в воздухе, соответствующие норме, и их критически допустимые значения, а также значения интенсивности поглощения кислорода и интенсивности выделения углекислого газа при дыхании. В результате, исходя из этих данных, выяснено, за какое время в модельном помещении без вентиляции уровень концентрации кислорода снизится до предельно допустимого, а уровень концентрации углекислого газа достигнет максимально допустимого значения. Также дана приблизительная оценка мощности вентиляционной системы или фильтрующей установки для некоторого выбранного в модели объёма помещения и соответствующего количества присутствующих в нём людей. Показаны возможные способы улавливания углекислого газа, и проанализировано, на основе каких физических принципов может производиться работа фильтрующих устройств. Методом исследования является тщательное изучение имеющихся способов улучшения качества воздуха в помещении, в результате которого выбраны наилучшие способы решения проблемы. Сделаны конкретные рекомендации.

**Ключевые слова:** газовый режим, параметры микроклимата, углекислый газ, кислородные дозаторы, оптимальная концентрация, предельно допустимая концентрация, парциальный объём, мощность вентиляционной системы, фильтрация, адсорбирующие материалы.

# PROBLEMS OF ENRICHING INDOOR AIR WITH OXYGEN AND REMOVING CARBON DIOXIDE FROM IT

© The Author(s) 2024

**RADIONOV Nikolai Vladimirovich,** lecturer at the department of general and applied physics, postgraduate student
*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)*
*(129337, Russia, Moscow, Yaroslavskoe highway, 26, e-mail: nradion1@gmail.com)*
**SLUGINOVA Natalia Ivanovna,** candidate of agricultural sciences,
associate professor of the Department of Technology and Technosphere Safety
*Penza State Technological University*
*(440039, Russia, Penza, Baidukova Drive/Gagarina Street, 1a/11, e-mail: princess _ natalia@mail.ru)*
**KLEYMENOVA Tamara Valeryevna,** candidate of agricultural sciences,
associate professor of the Department of Technology and Technosphere Safety

*Penza State Technological University*
*(440039, Russia, Penza, Baidukova Drive/Gagarina Street, 1a/11, e-mail: kleimenovatv@penzgtu.ru)*

**Abstract.** The paper considers the situation when the functioning of mechanical ventilation system cannot provide the building premises with air of the required quality due to the environmentally unfavorable condition of the surrounding air environment. The purpose of the work is to show possible approaches to the organization of a safe gas regime of the room in case of refusal of supply ventilation or at a much less intensive mode of its operation. The comparison of characteristic indicators of carbon dioxide concentration in the room, established by construction normative documents, with the values from the recommendations obtained on the basis of hygienic research is considered in detail. In the work recommendations are given, how from well-known gas laws it is possible to come to values, which will be used in this work for quantitative estimation of this or that component of air. The values of oxygen and carbon dioxide concentrations in the air corresponding to the norm and their critically acceptable values, as well as the values of the intensity of oxygen absorption and the intensity of carbon dioxide release during breathing are given. The result, based on these data, is a determination of how long it will take for the oxygen concentration level in the model room without ventilation to drop to the maximum permissible level and for the carbon dioxide concentration level to reach the maximum permissible level. It also gives a rough estimate of the capacity of the ventilation system or filter plant for some selected volume of the model room and the corresponding number of people present in it. Possible methods of carbon dioxide capture are shown, and it is analyzed, on the basis of what physical principles the operation of filtering devices can be made. The research method is a thorough examination of the available ways to improve indoor air quality, resulting in the selection of the best ways to solve the problem. Specific recommendations are made.

**Keywords:** gas mode, microclimate parameters, carbon dioxide, oxygen dispensers, optimal concentration, maximum permissible concentration, partial volume, ventilation system power, filtration, adsorbent materials.

*Для цитирования: Радионов Н.В. Проблемы обогащения кислородом воздуха помещения и удаления из него углекислого газа / Н.В. Радионов, Н.И. Слугинова, Т.В. Клейменова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 4(68). – С. 293-299. – EDN: QWVFPC.*

**Введение.** Хорошо известно, что экологическое состояние воздушной среды многих городов, особенно крупных промышленных центров, часто не соответствует официальным нормативным нормам. В наружном воздухе могут присутствовать в повышенной концентрации углекислый газ ($CO_2$) серосодержащие выбросы, летучие органические соединения, аэрозоли и другие агенты. В помещениях здания, где люди находятся длительное время, необходимо поддерживать требуемые микроклиматические параметры воздушной среды, одним из которых является уровень концентраций вредных примесей – он не должен превышать определённое значение, установленное нормативными документами. Однако, если воздух, окружающий здание, загрязнён (например, углекислым газом [1]), при работе механической вентиляционной системы он будет поступать в помещение, делая во многом неэффективным процесс такой вентиляции. Встаёт вопрос об ограничении доступа наружного воздуха внутрь здания, и, значит, требуется такая система вентиляции, которая позволит обновлять воздушную среду помещений здания без использования наружного воздуха.

Таким образом, возникает необходимость искать другие пути обеспечения помещения воздухом требуемого качества. В процессе дыхания людей, находящихся в помещении, происходит поглощение кислорода ($O_2$). Концентрация жизненно необходимого кислорода в воздухе при этом истощается, если отсутствует его обычное пополнение вместе с воздухом из вне. На первый взгляд, одним из возможных технологических принципов организации системы вентиляции при таких условиях может являться способ насыщения кислородом воздушной среды помещения посредством кислородных дозаторов. Отказ от замены в помещении внутреннего воздуха на наружный или включение значительно менее интенсивного режима воздухообмена одновременно существенно уменьшит расходы энергии на подогрев приточного воздуха и на стимуляцию его движения.

Вместе с тем, данный подход восстановления воздуха в достаточно изолированном помещении никак не может быть применён на практике без удаления из этого помещения избытка углекислого газа, выделяющегося в процессе дыхания, а также изначально присутствующего в атмосферном воздухе [2]. Кроме того, увеличение концентрации углекислого газа до предельно допустимого уровня происходит значительно быстрее, чем снижение концентрации кислорода до уровня кислородного голодания.

**Методология.** Цель данной работы следующая. Установить, насколько оправданным и возможным является полный или частичный отказ от приточной вентиляции с применением при этом устройств обогащения воздуха кислородом; и далее выяснить, насколько это важно, и как обеспечить в данном случае своевременное удаление из помещения избыточного углекислого газа для выполнения санитарных норм.

Для реализации данной цели были поставлены следующие задачи: 1. Определить, за какое время концентрация кислорода в типовом помещении без вентиляции снизится до минимального допустимого значения, а также за какое время при аналогичных

условиях концентрация углекислого газа возрастёт до предельного уровня. 2. Установить, как интенсивно должна функционировать система удаления углекислого газа при частичном или полном отказе от приточной вентиляции. 3. Провести анализ существующих технологических решений в области удаления углекислого газа из воздушной среды помещения.

При решении поставленных задач мы воспользовались понятием парциального объёма, чтобы по известным из литературы данным потребления кислорода человеком (в объёмных единицах за единицу времени) установить, через какое время в результате дыхания людей парциальный объём кислорода уменьшится от исходного значения до минимально допустимого. С помощью этих же понятий мы оцениваем время увеличения концентрации углекислого газа до предельно допустимого уровня. Для удобства в работе приводится простая взаимосвязь парциального объёма с мольной долей (концентрацией) вещества в воздушной среде.

В ходе подготовки работы были изучены публикации по теме удаления углекислого газа из воздуха помещения, соответствующие нормативные документы, а также специальная литература с описанием технологий, обеспечивающих очистку атмосферы обитаемых герметичных объектов специального назначения.

**Результаты.** *Нормативы и санитарно-гигиенические рекомендации.* Превышение концентрации углекислого газа негативно сказывается на жизнедеятельности человека. Даже кратковременное пребывание в помещении с повышенным уровнем концентрации $CO_2$ является некомфортным. Длительное же пребывание в такой среде оказывает существенно негативное влияние на работоспособность человека и на его самочувствие [3, 4].

Отметим, что оптимальный уровень концентрации углекислого газа и верхняя граница его концентрации, отмеченные в рекомендациях гигиенистов, и они же, предписанные строительными нормами, несколько разнятся. Если следовать [5], то оптимальный для здоровья уровень концентрации $CO_2$ в помещениях первой категории лежит в пределах от 800 до 1000 ppm (или 0.08-0.1%). При этом предельно допустимая концентрация углекислого газа в помещении равняется 1400 ppm (0.14%). Эти совсем нежесткие ограничения не оправдываются полученными результатами исследований, проводившихся с участием людей. Так, например, уже при концентрации 0.1% каждый второй испытуемый начинал ощущать дискомфорт даже при недлительном пребывании в таких условиях, то есть, оставаясь ещё в тех рамках, которые утверждены нормативом как оптимальный уровень содержания $CO_2$.

Сложность ситуации ещё и в том, что 800 ppm (0.08%) – это достаточно обыкновенная концентрация углекислого газа в наружном воздухе крупного города, а в помещении, в котором постоянно присутствуют люди, она, как правило, бывает намного выше. Значит, чтобы поддерживать концентрацию $CO_2$ внутри на том уровне, что и снаружи здания, необходима мощная система вентиляции. Однако, как уже говорилось, это далеко не всегда имеет смысл делать из-за присутствующих в наружном воздухе загрязнителей другого происхождения.

Всё же эту цифру 0.1% можно считать допустимой концентрацией углекислого газа для обычных сооружений и зданий различного назначения – но только при кратковременном пребывании человека в таких условиях [6]. Это значение концентрации $CO_2$ в каком-то смысле является пороговым, при превышении которого у пребывающих в помещении людей могут наблюдаться учащение пульса, головная боль, головокружение, слабость, усталость, потеря чувствительности, нарушение концентрации внимания. Исследования, однако, показывают, что длительное воздействие $CO_2$ даже в значительно меньших концентрациях является опасным фактором, провоцирующим негативные последствия. Всё это чревато проблемами с дыхательной системой, снижением иммунитета, ухудшением работы сердечно-сосудистой системы. Установлено, что долговременное пребывание в помещении с уровнем концентрации углекислого газа даже незначительно выше 0.05% может привести к изменениям в метаболизме, прежде всего, к снижению *pH* сыворотки крови, то есть к ацидозу. Такие потенциально опасные изменения в организме без устранения их причины приобретают хронический характер и приводят к уязвимости перед другими негативными факторами [7]. Поэтому отметим, что предельно допустимая концентрация углекислого газа в помещениях должна устанавливаться с учетом времени пребывания там людей.

Итак, если даже в сравнительно низких концентрациях углекислый газ является сам по себе токсичным для человека, то учёт перечисленных обстоятельств особенно актуален, например, для офисных помещений, в которых люди пребывают в течение рабочего дня, причём изо дня в день в течение месяцев [2]. Решением проблемы может считаться снижение содержания углекислого газа в воздухе помещения до уровня его концентрации в атмосфере в экологически чистой местности, то есть до уровня в диапазоне 0.04-0.05%.

Представим количественную оценку, за какое время происходит падение концентрации кислорода в воздухе типичного офисного помещения до предельно допустимого уровня, а также увеличение концентрации углекислого газа до неприемлемого (и даже небезопасного) для человека уровня.

*Динамика изменения концентраций кислорода и углекислого газа.* Мольная доля или просто концентрация одного из газов в газовой смеси может быть выражена как отношение парциального давления этого газа к суммарному давлению всей сме-

си газов. Под парциальным давлением понимают давление, которое имел бы газ, входящий в состав газовой смеси, если бы он один занимал весь объём помещения при той же температуре. Для парциального давления $p_i$ $i$-ого газа смеси справедливо известное соотношение Клапейрона-Менделеева $p_i V = N_i kT$, где $V$ – это объём помещения, $N_i$ – число частиц некоторого $i$-ого газа, а $kT$ – произведение постоянной Больцмана на абсолютную температуру. Если сложить эти уравнения, написанные для каждого из компонентов смеси, то получим $\sum p_i V = \sum N_i kT$. Разделив уравнение Клапейрона-Менделеева для $i$-ого газа на последнее уравнение, получим $p_i / \sum p_i = N_i / \sum N_i$, то есть, что и утверждалось, отношение парциального давления $i$-ого газа к давлению всей смеси (которое есть сумма парциальных давлений по закону Дальтона) есть безразмерная концентрация данного компонента, то есть доля компонента в смеси газов.

В дальнейшем мы будем пользоваться понятием парциального объёма, когда будет речь о поглощении из смеси (или выделении в смесь) некоторого объёма какого-нибудь газа. По определению парциальный объём (или для краткости просто объём), например, молекулярного кислорода это тот объём, который он бы занимал, если бы один в прежнем количестве имел бы температуру и давление, что и вся газовая смесь. Увидим, что отношение парциального объема, пусть, кислорода к объёму всего помещения, который занимает смесь газов, будет равняться концентрации. Значит, умножив концентрацию на объём помещения, мы сможем найти объём кислорода, и далее, зная различные данные в процентах о поглощении, уже рассматривать именно в этом смысле, сколько (в единицах объёма) кислорода было поглощено.

Поясним сказанное. Уравнение Клапейрона-Менделеева для кислорода гласит $p_{O_2} V = N_{O_2} kT$ . Следуя же определению парциального объёма $V_{O_2}$, запишем $\sum p_i V_{O_2} = N_{O_2} kT$. Приравняв левые части обоих уравнений, получим $p_{O_2} V = \sum p_i V_{O_2}$, откуда сразу же следует $p_{O_2} / \sum p_i = V_{O_2} / V$. А так как отношение парциального давления кислорода к давлению всей смеси $p_{O_2} / \sum p_i$ равняется концентрации кислорода $C_{O_2} = N_{O_2} / \sum N_i$, то справедливо $C_{O_2} = V_{O_2} / V$. Значит, парциальный объём кислорода выражается через его концентрацию и объём помещения как $V_{o_2} = C_{O_2} V$. Этим выражением и будем пользоваться.

Рассмотрим ситуацию, когда в помещении объёмом $V=30$ м$^3$ находятся два человека [8]. К примеру, это может быть кабинет в административном здании. Сделаем приблизительную оценку, за какое время концентрация кислорода в кабинете снизится до предельно допустимого минимального уровня. Начальная концентрация кислорода в воздухе помещения принимается такой же, как и в свободной атмосфере вблизи земной поверхности, $C_{O_2 начальная} = 21\% = 0{,}21$. Наступление кислородной недостаточности начинается при концентрации кислорода в воздухе $C_{O_2 min} = 14\% = 0{,}14$. При спокойном дыхании одного человека потребление кислорода составляет $q_{O_2 min} = 0{,}25$ л/мин или $2{,}5 \cdot 10^{-4}$ м$^3$/мин. Время, в течении которого при дыхании двух человек и полном отсутствии притока наружного воздуха уровень концентрации кислорода снизится до минимально допустимого

$\Delta t_{O_2} = (C_{O_2 начальная} - C_{O_2 min}) \cdot V / 2\, q_{O_2} = 4200$ мин $\approx 3$ суток.

Теперь выясним, за какое время при этом уровень концентрации углекислого газа достигнет своего максимально допустимого значения. Процентные соотношения объёмов поглощённого в ходе дыхания кислорода и выделившегося на выдохе углекислого газа к общему объему воздуха, который поступил в лёгкие, отличаются незначительно. Поэтому мы можем принять интенсивность выделения углекислого газа равной интенсивности потребления кислорода. То есть при спокойном дыхании одного человека $q_{CO_2} = 0{,}25$ л/мин или $2{,}5 \cdot 10^{-4}$ м$^3$/мин. Предельно допустимым уровнем концентрации $CO_2$ с учётом изложенного ранее примем значение $C_{CO_2 max} = 0.1\% = 10^{-2}$. Начальный уровень концентрации углекислого газа возьмём соответствующий экологически благополучной местности, $C_{CO_2 начальная} = 4 \cdot 10^{-4}$. Итак, время, за которое концентрация $CO_2$ достигнет предельного уровня

$\Delta t_{CO_2} = (C_{CO_2 max} - C_{CO_2 начальная}) \cdot V / 2\, q_{CO_2} = 45$ мин.

Мы видим, что первоочередной задачей обеспечения благоприятного газового режима здания является именно оперативное удаление углекислого газа. Снабжение же кислородом, с учетом весьма длительной его убыли до недопустимых концентраций, может быть произведена достаточно маломощной вентиляционной системой или, в случае невозможности по экологическим обстоятельствам пользоваться приточным воздухом, с помощью кислородных дозаторов или генераторов.

Здесь мы оценим, какова должна быть мощность вентиляционной системы, чтобы произвести полную замену воздуха в таком, полном углекислого газа, помещении. Но сделаем это не для случая, когда помещение находится в экологически благополучной местности и начальная концентрация $CO_2$ имеет идеальное значение, а для московского офисного помещения, расположенного, например, в ЦАО. Концентрация углекислого газа в наружном воздухе тут зачастую близка к значению $8 \cdot 10^{-4}$. Этим помещением может быть также учебная аудитория. Предположим, что объём помещения 200 м$^3$, и в нём находятся 20 человек. Таким образом, время, в течение которого уровень концентрации углекислого газа в этом помещении достигнет максимально допустимого уровня рассчитывается аналогично предыдущим оценкам и равняется всего $\Delta t_{CO_2} = (C_{CO_2 max} - C_{CO_2 начальная}) \cdot V / 20 q_{CO_2} = 8$ мин. Если ставится задача путём вентилирования снизить концентрацию $CO_2$ до уличного уровня, далеко не самого благоприятного, но, всё-таки, допустимого, система вентиляции должна за это

время полностью заместить весь объём воздуха в помещении свежим воздухом. Производительность такой системы вентиляции легко оценить как $V / \Delta t_{CO_2} = 20 q_{CO_2} / (C_{CO_2 max} - C_{CO_2 начальная})$, что для принятого значения начальной концентрации $C_{CO_2 начальная} = 8 \cdot 10^{-4}$ будет равняться 25м³ / мин= 1500 м³ / час . В случае, когда приточная вентиляция неприемлема, эта же оценка должна приниматься для производительности циркулирования воздуха через фильтрующие установки.

*Возможные решения проблемы удаления (улавливания) углекислого газа.* Когда обычная приточная вентиляция невозможна или её использование должно быть сильно ограничено, становятся актуальными вопросы, 1 – каким образом удалить углекислый газ из воздуха в помещении или же 2 – как снабдить систему централизованной или компактной вентиляции специальными фильтрующими устройствами, которые будут препятствовать проникновению углекислого газа внутрь. Таким образом, перед нами два возможных подхода к улавливанию углекислого газа. Второй способ является менее экономичным, так как при нем необходимо нагревание, подаваемого внутрь отфильтрованного наружного воздуха.

Что касается физического принципа, на котором будет основываться работа фильтрующего устройства, здесь предлагаются разные варианты [9-11]. Большинство перспективных разработок в этой области предполагают фильтрацию воздуха путём пропускания его через те или иные адсорбирующие углекислый газ материалы. Одно из направлений ведущихся исследований – это синтез более совершенных адсорбирующих материалов [12-14]. Например, в качестве адсорбирующего вещества могут быть использованы те искусственно синтезированные цеолиты, которые обладают высокой адсорбционной избирательностью в отношении углекислого газа [15]. Зачастую, именно особенности химического состава адсорбента играют определяющую роль для достижения высокой адсорбционной способности, а не площадь его поверхности или объём пор [16].

Также, на первый взгляд, может показаться, что удаление углекислого газа возможно организовать через адсорбцию его молекул слоем специально подобранного отделочного материала стен помещения. Многие отделочные материалы обладают пористой структурой, что способствует адсорбционному процессу [17-18]. Например, ранее широко используемая, известковая побелка поглощает углекислый газ из окружающего воздуха. В действительности оказывается, что, как и сама гашёная известь, так и вяжущие вещества на её основе, при химической реакции с углекислым газом дают среди прочих продуктов реакции ещё и воду. Следствие этого – повышенная влажность в помещении. Кроме того, конденсация воды в капиллярах отделочного материала и, образующаяся в ходе карбонизации, низкопроницаемая плёнка [19] – всё это будет препятствовать проникновению углекислого газа внутрь слоя такого материала. Нельзя забывать и о требовании высокой селективности, которое накладывается на материал, выбираемый для адсорбции. Это требование выполнить весьма непросто (например, чтобы адсорбент хорошо поглощал углекислый газ, но не поглощал водяной пар). И, наконец, выходит, что ещё и регенерация адсорбента, нанесённого на поверхность стен помещения, фактически невозможна. Таким образом, использование адсорбирующих углекислый газ строительных материалов в настоящее время никак нельзя считать удовлетворительным решением исследуемой проблемы.

Другое перспективное направление заключается в приспособлении для фильтрации $CO_2$ мембранных технологий. Есть достаточно «обкатанные» технологии, которые используются при фильтрации промышленных выбросов в атмосферу [20]. Однако, непосредственный перенос этих технологий для обустройства вентиляционных систем жилых и общественных зданий, очевидно, невозможен, так как в данном случае требуется их компактность, бесшумность и безопасность и, притом, экономическая рентабельность. Отметим, что почти все предлагаемые разработки имеют опытный характер и практически никак не представлены на рынке. То есть, общепринятого адекватного технологического решения задачи удаления углекислого газа из воздуха в самом помещении (или из воздуха, подаваемого в помещение из вне), пока не существует.

На отечественном рынке климатической техники всё же есть два устройства для удаления углекислого газа из помещений жилых или административных зданий. Одно из этих устройств, разработка ТРИНИТИ Росатома, пока лишь только опытный образец. Оно было широко прорекламировано, но в серийное производство не запущено. Его аналог – поглотитель углекислого газа UNIQFRESH, выпущенный финской компанией Alfaintek, и уже более пятнадцати лет продаваемый в разных странах мира. Как отмечается [21], этот поглотитель лёгок в эксплуатации, работает полностью автоматически и бесшумно. Устройство представлено в трёх моделях, главным образом, различающихся по производительности поглощения $CO_2$ за один режим фильтрации. Всасываемый воздух циркулирует, проходя трёхступенчатый фильтр. На первом этапе комбинированный угольный фильтр удаляет пыль, пыльцу и запахи. Далее, противоаллергенный фильтр ХЕПА удаляет частицы и споры плесени. И на третьем этапе с помощью кассетного фильтра-адсорбера излишний углекислый газ удаляется из помещения. Адсорбент углекислого газа можно регенерировать свыше 5000 раз, то есть он может эксплуатироваться около пятнадцати лет. Угольный фильтр заменяется раз в девять месяцев, а фильтр ХЕПА подлежит смене раз в пять лет.

**Обсуждение.** Итак, основная проблема поддер-

жания минимальной концентрации углекислого газа в помещении, в основном, решается очисткой воздуха помещения и активным воздухообменом. В городских условиях при уже большой концентрации углекислого газа и прочих вредных аэрозольных примесей в наружном воздухе организация необходимого воздухообмена требует больших затрат и иногда является недостаточно эффективной.

Поэтому более разумным является очистка воздуха помещения с помощью фильтров различного назначения. Но решение проблемы требует индивидуального подхода. Необходимо учитывать качество окружающего помещение воздуха, и при хороших его параметрах правильно рассчитывать воздушный режим помещения, а при плохих – главным способом будет являться фильтрация воздуха и искусственное обогащение его кислородом.

Наша оценка требуемой мощности системы приточной вентиляции или фильтрующей установки для рассмотренного типового помещения в нелучшей по содержанию углекислого газа окружающей среде справедлива (для допускаемой нормы, и санитарно-гигиенических рекомендаций). Очевидно, что чем меньше предельно допустимая концентрация углекислого газа $C_{CO_2max}$ отличается от исходной концентрации $C_{CO_2начальная}$ (равной концентрации углекислого газа на улице), тем за меньшее время воздух в помещении достигнет максимально допустимого уровня, и, соответственно, тем мощнее должна быть система вентиляции, чтобы за это малое время успеть удалить из помещения воздух, концентрация $CO_2$ в котором постоянно увеличивается вследствие дыхания людей в этом помещении. Однако, разбавить воздух в помещении, критичный по уровню углекислого газа, чтобы поддерживать его на отметке, например, 0.08% существенно менее энергозатратно, чем поддерживать его на меньшем уровне (к примеру, 0,04%). Объясняется это кажущееся противоречие тем, что в нашей оценке имелась в виду полная замена фактического воздуха в помещении на новый. Объём этого воздуха вообще не зависит от того, какая концентрация была. При таком расчете понятно, что она будет равна концентрации наружного воздуха. От уровня концентрации, который был исходно в помещении и который пытаемся поддерживать, зависит лишь время, за которое уровень концентрации углекислого газа в помещении поднимется до крайнего допустимого значения. Более строгий подход приводит нас к необходимости решения дифференциального уравнения, решение которого – зависимость концентрации от времени задавалась бы функцией, экспоненциально спадающей (при начальном уровне концентрации $C_{CO_2начальная} > C_{CO_2снаружи}$) и асимптотически выходящей на уровень концентрации воздуха снаружи, если не брать в учёт производство $CO_2$ от находящихся в помещении людей.

**Выводы.** Применение устройств обогащения кислородом воздуха помещения является возможным решением проблемы обеспечения помещений качественным воздухом при отказе от приточной вентиляции из-за неблагоприятной экологической обстановки. Но их использование при этом должно быть лишь совместным с использованием системы удаления углекислого газа.

Нормы допустимого содержания в воздухе углекислого газа необоснованно завышены в строительных нормах по сравнению с теми, которые рекомендуются санитарными нормами. Невыполнение санитарных норм приводит к ухудшению работоспособности и, соответственно, к понижению эффективности труда, что в свою очередь ухудшает экономику предприятия. Итак, при проектировании вентиляционных систем следует принимать во внимание санитарно-гигиенические рекомендации, сделанные на основе научных исследований. Следует также рассматривать, каково предполагается время пребывания людей в данном помещении, а также необходим обязательный учёт экологического фактора (то есть нужно иметь в виду, насколько критична концентрация углекислого газа в наружном воздухе).

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Васильева Е.В., Виноградов О.В., Графкина М.В. и др. Результаты экспериментальных исследований процессов поглощения углекислого газа // Технологии гражданской безопасности. – 2023. – №2. – С. 5-10.
2. Арсеньев А. Современные системы абсорбции // СОК. – 2011. – №11.
3. Бутцев Б. Хороший вопрос: Как бороться с духотой в помещении? // URL: https://www.houzz.ru/statyi/horoshiy-vopros-kak-borotysya-s-duhotoy-v-pomeshchenii-stseti-vw-vs~70610926 (дата обращения: 26.09.2024).
4. Гесс М. Сколько вешать в граммах: нормы CO2 // URL: https://tion.ru/blog/normy-co2/ (дата обращения: 26.09.2024).
5. ГОСТ 30494-2011 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях».
6. Стефанов Е.В. Вентиляция и кондиционирование воздуха. СПб.: АВОК Северо-Запад, 2005. – 400 с.
7. Робертсон Д.С. О том, как влияет растущий уровень CO2 в атмосфере на организм человека // СОК. – 2008. – №4.
8. Минеев А. Дышите на здоровье! // Квант. – 2020. – №4. – С. 29-38.
9. Никифоров Ю.В., Казакова А.А., Алёхина М.Б. Диффузия и адсорбция газов и паров в инженерных задачах. М.: Изд-во Мос. гос. тех. ун-та им. Н.Э. Баумана, 2017. – 165 с.
10. Самонин В.В., Подвязников М.Л., Никонова В.Ю. и др. Сорбирующие материалы, изделия, устройства и процессы управляемой адсорбции. СПб.: Наука, 2009. – 271 с.
11. Гладышев Н.Ф., Гладышева Т.В., Дворецкий С.И. Системы и средства регенерации и очистки воздуха обитаемых герметичных объектов. М.: Спектр, 2016. – 204 с.
12. Привалова Е.И., Мяки-Арвела П., Мурзин Д.Ю. и др. Поглощение $CO_2$: традиционные подходы и современные методы, основанные на использовании ионных жидкостей // Успехи химии. – 2012. – №5. – С. 435-457.
13. Роддугин В.И. Физикохимия поверхности: Учебник-монография. Долгопрудный: Интеллект. – 2011. – 568 с.
14. Гладышев Н.Ф., Гладышева Т.В., Путин Б.В. и др. Известковые поглотители нового поколения. М.: Спектр, 2012. – 136 с.
15. Фокина О.А., Кузнецов Д.А., Боровская Л.В. Адсорбция и диффузия газов в цеолитах // The scientific heritage. 2021. №81. – С. 39-40.
16. Kim S.N., Son W.J., Choi J.S. et al. Micropores CO2 adsorption using amine-functionalized mesoporous silica prepared via anionic surfactant-mediated synthesis // Microporous and

Mesoporous Materials. – 2008. – Vol. 115. – P. 497-503.
17. Michail R.Sh., Turk D.H., Brunauer S. Dimensions of the average pore, the number of pores, and the surface area of hardened Portland cement paste // Cement and concrete researh. – 1975. – Vol. 5. – P. 433-442.
18. Brunauer S., Michail R.Sh., Bodor E.E. Some remarks about capillary condensation and pore structure analysis // Journal of colloid and interface science. – 1967. – Vol. 25. – P. 353-358.
19. Логанина В.И. Известковые сухие строительные смеси для реставрации и отделки зданий и сооружений. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та арх-ры и стр-ва, 2015. – 320 с.
20. Rochelle G.T. Amine scrubbing for CO2 capture // Science. – 2009. – Vol. 325. – № 5948. – P. 1652-1654.
21. URL: https://www.alfaintek.eu/assets/files/ABEK_LUX-AIR_UNIQFRESH.pdf (дата обращения: 26.02.2023); URL: https://www.alfaintek.eu/upload/brochure_UNIQFRESH_home_RUS_2007_09_07.pdf (дата обращения: 26.09.2024).

*Статья поступила в редакцию 20.09.2024*
*Статья принята к публикации 13.12.2024*

УДК 614.842/.847
EDN: OXXIMO

# ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ НАНОМОДИФИЦИРОВАНИЯ ПРИ СОЗДАНИИ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА

© Автор(ы) 2024
SPIN: 6886-9928
AuthorID: 792929
ORCID: 0000-0002-4854-9321
ResearcherID: A-3805-2015

**ИВАНОВ Алексей Владимирович,** кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Пожарная безопасность технологических процессов и производств»
*Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России*
*(196105, Россия, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149, e-mail: ivanov.av@igps.ru)*

**Аннотация.** Рассмотрены направления применения технологий наномодифицирования для обеспечения пожарной безопасности объектов нефтегазового комплекса. Представлены ключевые параметры процессов наномодифицирования и результаты их внедрения, направленные на снижение пожарного риска и повышение эффективности систем противопожарной защиты. Основное внимание уделяется использованию углеродных наноструктур в различных аспектах обеспечения пожарной безопасности: рецептуры огнетушащих составов, материалы для защитной одежды пожарных, модификаторы огнезащитных составов, а также материалы пониженной горючести из растительного сырья. В работе анализируются преимущества использования наномодифицированных материалов в каждом из этих направлений. Отмечается повышение эффективности огнетушащих составов, улучшение защитных свойств боевой одежды пожарных, увеличение огнестойкости защитных покрытий от воздействия высоких температур и создание инновационных природных материалов с улучшенными огнезащитными свойствами. Результаты исследования демонстрируют значительный потенциал технологий наномодифицирования в области пожарной безопасности. Внедрение этих разработок может существенно повысить уровень защиты объектов нефтегазового комплекса от пожаров, снизить риски возникновения пожаров и минимизировать возможный ущерб. Подчеркивается необходимость проведения дальнейших исследований и разработок с целью оптимизации параметров наномодифицирования и расширения сферы применения нанотехнологий в системе обеспечения пожарной безопасности объектов нефтегазового комплекса.

**Ключевые слова:** углеродные наноструктуры, огнетушащие составы, боевая одежда пожарного, огнезащитные покрытия, природные материалы, пожаротушения, нефтегазовый комплекс, термостойкость.

# PRACTICAL APPLICATIONS OF NANOMODIFICATION TECHNOLOGIES IN THE CREATION OF SUBSTANCES AND MATERIALS IN THE FIRE SAFETY SYSTEM OF OIL AND GAS ENTERPRISES

© The Author(s) 2024
**IVANOV Alexey Vladimirovich,** candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor at the department of fire safety technological processes and production
*Saint-Petersburg University of State fire service of EMERCOM of Russia*
*(196105, Russia, St. Petersburg, Moskovsky prospect, 149, e-mail: e-mail: ivanov.av@igps.ru)*

**Abstract.** The directions of application of nanomodification technologies to improve fire safety of oil and gas facilities are considered. The key parameters of nanomodification processes and the results of its implementation aimed at reducing the likelihood of fires and increasing the effectiveness of fire protection systems are presented. The main attention is paid to the use of carbon nanostructures in various aspects of fire safety: formulations of fire extinguishing agents, material for protective clothing for firefighters, a modifier of flame retardants, as well as technologies for modifying plants in order to obtain raw materials with increased flammability. The paper analyzes the advantages of using nanomodified materials in each of these areas. There is an increase in the effectiveness of fire extinguishing compounds, an improvement in the protective properties of firefighters' combat clothing, an increase in the fire resistance of protective coatings against high temperatures and the creation of innovative natural materials with improved flame retardant properties. The results of the study demonstrate the significant potential of nanomodification technologies in the field of fire safety. The implementation of these developments can significantly increase the level of protection of oil and gas facilities from fires, reduce the risks of fires and minimize possible damage. The need for further research and development in this area is emphasized in order to optimize the parameters of nanomodification and expand the scope of nanotechnology in the fire safety system of oil and gas facilities.

**Keywords:** carbon nanostructures, fire extinguishing agents, firefighter's combat clothing, flame retardant coatings, natural materials, fire extinguishing, oil and gas complex, heat resistance.

***Для цитирования:*** *Иванов А.В. Практические приложения технологий наномодифицирования при создании веществ и материалов для обеспечения пожарной безопасности предприятий нефтегазового комплекса / А.В. Иванов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 4(68). – С. 300-308. – EDN: OXXIMO.*

**Введение.** Научно-практические решения по использованию технологий наномодифицирования [1, 2] для обеспечения пожарной безопасности на объектах нефтегазового комплекса (НГК) базируются на «нанокомпозитном подходе» [3], заключающемся в синтезе и (или) интеграции наноструктур в традиционные материалы, присутствующие на рынке пожарно-технической продукции, для улучшения их эксплуатационных характеристик. Данные технологии требуют междисциплинарного подхода, включающего в себя физику, химию и инженерию, и реализуются в жидких средах и на границе раздела фаз, что позволяет создавать и манипулировать структурами с размерами от десятков нанометров до нескольких нанометров [4]. В результате в традиционных материалах, использующихся в системах предотвращения пожара и противопожарной защиты, могут проявляться определенные свойства (термическая стабильность, теплопроводность, электропроводность, барьерные свойства) и характеристики (огнетушащая способность, термостойкость, механическая прочность, стойкость к негативам воздействиям окружающей среды и др.), обеспечивающие их повышенную эффективность на объектах с обращением нефтепродуктов. Объектами реализации технологий наномодифицирования с помощью углеродных наноструктур (УНС) в системе обеспечения пожарной безопасности [5, 6] предприятий НГК являются:

– огнетушащие вещества (ОТВ) на основе воды, воздушно-механической пены, а также огнетушащие порошки для штатного пожарно-технического оборудования и модульных установок пожаротушения;

– конструктивная огнезащита и тонкослойные огнезащитные покрытия для металлоконструкций с повышенной огнезащитной эффективностью в условиях горения углеводородов;

– усовершенствованные термостойкие материалы для специальной защитной одежды, покрытий для изоляции очага возгорания, средств индивидной защиты пожарных и спасателей;

– модификаторы для сорбентов, применяющихся для локализации аварийных проливов нефтепродуктов, снижающие интенсивность испарения легковоспламеняющейся жидкости (ЛВЖ) и горючей жидкости (ГЖ).

Сводные данные по проведенным исследованиям изложены в таблице 1.

*Таблица 1 – Сводные данные результатов исследований*

| № п.п. | Технология модифицирования | Оптимальная концентрация УНС | Результат (в сравнении с немодифицированными веществами и материалами) | Источник |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Ультразвуковое диспергирование УНС в огнетушащей суспензии для модульной установки пожаротушения тонкораспыленной водой | 0,5 об. % | Сокращение времени тушения модельного очага в 5 раз | [7] |
| 2 | Ультразвуковое диспергирование УНС в растворе пенообразователя 6 масс. % | 0,02 масс. % | Сокращение времени тушения модельного очага в 3 раза | [8] |
| 3 | Ультразвуковое диспергирование УНС воде и стабилизация с помощью редкосшитого акрилового полимера «Carbopol ETD 2020» | 0,4 об. % | Сокращение времени тушения модельного очага в 6 раз | [9] |
| 4 | Введение УНС в силиконовую пропитку с последующим нанесением на ткань | 0,001 масс. % | Сокращение остаточного времени горения материала до 20 раз после исключения прямого воздействия пламени | [10] |
| 5 | Реагентная функционализация УНС с последующим диспергированием в растворителе и введением в огнезащитный состав | 0,5 об.% | Увеличение времени начала термической деструкции покрытия на 30 % | [11] |
| 6 | Реагентная функционализация и ультразвуковое диспергирование УНС в бензине «НЕФРАС С2-80/120» | 0,2 масс. % | Сокращение интенсивности испарения на 30% | [12] |

Целью настоящего исследования является научно-методическое обоснование применения технологий наномодифицирования для улучшения эксплуатационных характеристик огнетушащих веществ и защитных материалов, на основании результатов экспериментальных исследований, натурных испытаний и расчетов пожарного риска.

**Методология.** В рамках исследования проведены различные испытания наноматериалов, применяющихся при обеспечении пожарной безопасности объектов нефтегазового комплекса. В 2022 году проведено тестовое испытание модуля пожаротушения тонкораспыленной водой объемом 18,5 л. с наномодифицированным составом с высотой подвеса 6 метров при тушении очага 223В.

В 2023 году проводились испытания огнетушащей способности лабораторной установки порошкового пожаротушения при ликвидации горения модельного очага 1В. В качестве горючей жидкости использовался бензин октановым числом 92. Лабораторная установка снаряжалась порошком «ВЕКСОН АВС-50». В качестве модификатора

использовались астралены (*Astr*) [5] в концентрации 0,5 масс. %. Огнетушащий порошок подавался в очаг пожара с интенсивностью 0,02 кг/с·м².

В 2024 году была проведена оценка огнезащитной эффективности огнезащитного вспучивающегося состава (ОВС) «Термобарьер-2», модифицированного углеродными нанотрубками (*MWCNT*) и *Astr*, на лабораторной установке, моделирующей режим факельного горения углеводородов. При подготовке модифицированных ОВС УНС вводились в один из компонентов состава в концентрации 0,2 масс.%. Остальные элементы технологии подготовки состава и его нанесения проводилось по ТУ 20.30.22-007-30642285-2017 с учетом условий работы с модифицированными огнезащитными составами [13].

В 2023 году, в рамках решения задач на межведомственных опытно-исследовательских учениях сил и средств единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций в Арктической зоне («Безопасная Арктика-2023») были проведены испытания водоэмульсионных огнетушителей (ОВЭ), снаряжённых огнетушащим составом с *Astr*. В качестве горючей жидкости использовался бензин автомобильный с октановым числом 92, ранг очага пожара: 21В. Изменения в конструкцию огнетушителей не вносились [9]. Также на учениях проведены натурные испытания материала верха боевой одежды пожарного (БОП), подверженного модифицированию *Astr*, в условиях высокотемпературного воздействия [10, 14].

Модифицирование материала БОП (готовое изделие, приобретенное на рынке пожарно-технической продукции) проводилось путем пропитки верхнего слоя суспензией на основе органического растворителя с присадками с наночастицами *Astr* в концентрации 0,1 масс.%.

Оценка термической стойкости композита БОП с модифицированным наружным слоем на основе углеродных материалов, а также с тканью БОП аналогичного типа без модифицирования защитного слоя, проводилась в огневом симуляторе при условиях, соответствующих ГОСТ Р 59693-2021. На БОП были установлены термоэлектрические преобразователи (термопары) для измерения температуры на внутренней поверхности. Термопары подключались к цифровому устройству, защищенному от высоких температур. В процессе испытаний фиксировались повреждения (опалины, сквозные прогары, деформация и разрушение слоев одежды) при максимальной температуре испытаний 600°С.

Оценка термической стойкости проводилась на установке «Термоскан-2» путем анализа ДТА-кривых (параметры исследования: скорость нагрева 10°С/мин, максимальная температура 800°С, среда: воздух) [15]. Наличие УНС в волокнах растений определялось с помощью метода рамановской спектроскопии на установке «Ntegra-Spectra» с длиной волны лазера 532 нм [16]. Для оценки влияния углеродных наноструктур на термическую стойкость натуральных волокон, применяющихся при производстве материалов были выбраны модификаторы, основу которых составляли *Astr*. Для реализации технологии модифицирования почвенного субстрата, использующуюся для выращивания льна, вводили суспензии *Astr* в водопроводной воде с концентрацией наночастиц 0,1 масс. %.

Значения потенциального и индивидуального пожарного риска в условиях применения углеродных наномодификаторов определялись для исследуемых в работе ЛВЖ по методике, изложенной в приказе МЧС России от 26.07.2024 г. № 533. В качестве объектов исследования были выбраны участки трубопроводов диаметром 100 и 150 мм, а также резервуар вертикальный стальной объемом 1000 м³.

Значения потенциального и индивидуального пожарного риска определялись по формулам (1) и (2):

$$P(A) = \sum_{i=1}^{j} Q_{di}(\alpha) \cdot Q(A_i) \quad (1)$$

Где $Q_{di}(a)$ – максимальная условная вероятность поражения человека, год $^{-1}$, $Q(A_i)$ – вероятность реализации в течение года $i$-й ветви логической схемы аварии, год $^{-1}$.

$$R = P(A) \cdot q \quad (2)$$

где $P(A)$ – значение потенциального риска для наиболее опасного события, год $^{-1}$, $q$ – вероятность присутствия работников на объекте.

**Результаты.** В ходе испытания модульных установок пожаротушения зафиксировано тушение модельного очага огнетушащим составом на основе воды с *Astr* в концентрации 0,2 об. % (рис. 1), в то время как при использовании базового состава аналогичной рецептуры модельный очаг потушен не был (рис. 2).

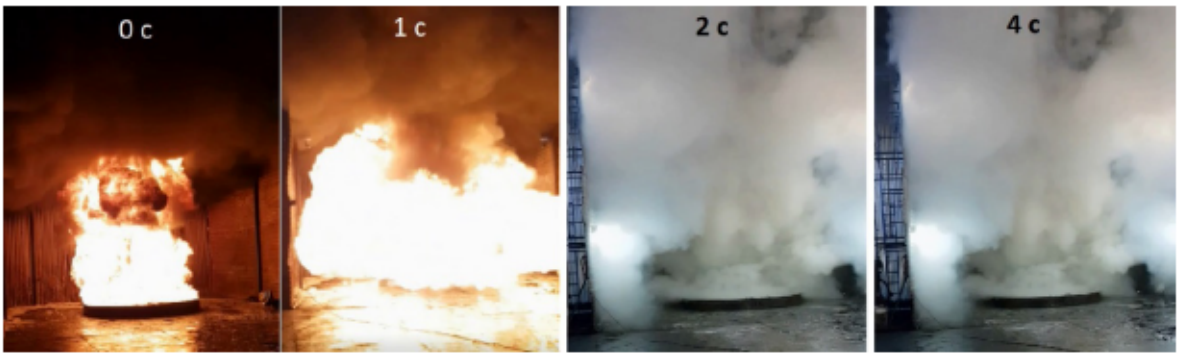



*Рисунок 1 – Фотографии тушения очага 223В МУПТРВ с модифицированным ОТВ*

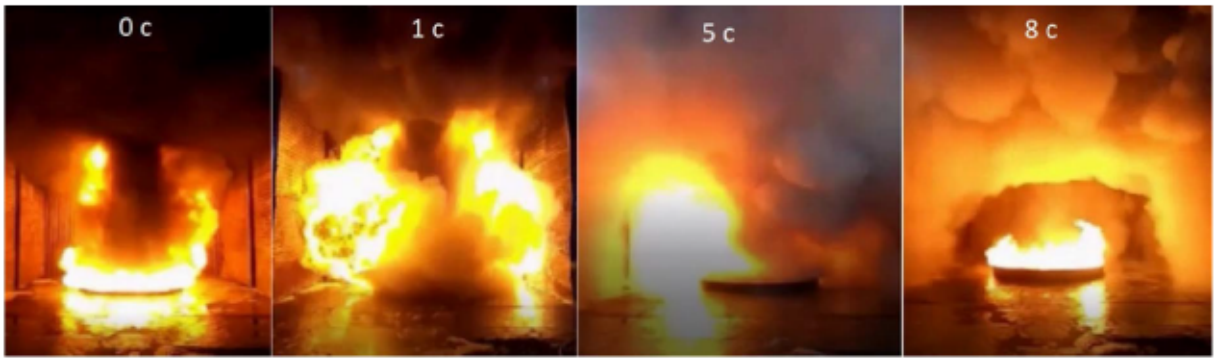



*Рисунок 2 – Фотографии тушения очага 223В МУПТРВ с базовым ОТВ*

При натурных испытаниях огнетушителей с модифицированным ОТВ установлено, что при использовании базового состава тушение модельного очага горения не достигнуто для 2-х пусков огнетушащего вещества из огнетушителей (рис. 3).

При использовании состава с УНС тушение модельного очага горения достигнуто для 2-х пусков ОТВ из огнетушителей (рис. 4).

Сводные данные о результатах испытаний ОВЭ представлены в таблице 2.

Применение огнетушащего состава с УНС показало сокращение времени тушения модельного очага при расходе, аналогичном ОВЭ с немодифицированной жидкостью.

В условиях применения модифицированного огнетушащего порошка наблюдалось прекращение горения, в то время как применение немодифицированного состава с данной интенсивностью не приводило к тушению модельного очага. Таким образом, результаты испытаний показали возможность использования УНС в качестве модификаторов огнетушащих жидкостей и порошков при ликвидации горения класса «В».

В ходе испытаний модифицированных огнетушащих составов зафиксировано увеличение времени огнезащитного действия модифицированных составов (на 26,7% для *MWCNT* и на 28,9% для *Astr*) в сравнении с немодифицированным составом «Термобарьер-2» при одинаковой толщине защитного покрытия (рис. 5).




*Рисунок 3 – Фотографии тушения очага 21В огнетушителем с базовым огнетушащим составом*

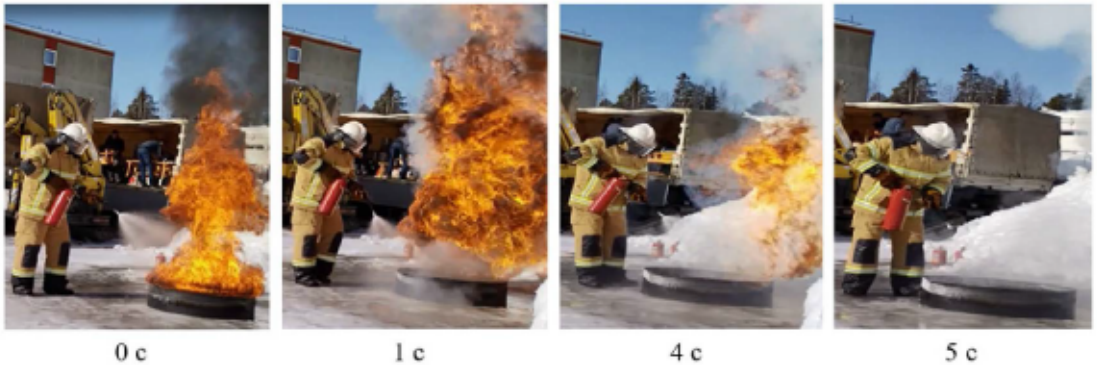



*Рисунок 4 – Фотографии тушения очага 21В огнетушителем с огнетушащим составом, содержащим УНС (тип 4)*

*Таблица 2 – Данные результатов испытаний ОВЭ*

| № п.п. | № огнетушителя | Масса неснаряженного огнетушителя, кг | Масса снаряженного огнетушителя до испытания, кг | Масса снаряженного огнетушителя после испытания, кг | Время выхода ОТВ, сек | Время ликвидации горения очага, сек |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1. | 0-1 | 1,7 | 3,7 | 1,8 | 9 сек | - |
| 2. | 0-2 | 1,7 | 3,6 | 1,7 | 10 сек | - |
| 3. | 1-1 | 1,7 | 3,8 | 1,9 | 8 сек | - |
| 4. | 1-2 | 1,7 | 3,6 | 1,7 | 11 сек | - |
| 5. | 4-1 | 1,7 | 3,7 | 3,1 | 4 сек | 3 сек |
| 6. | 4-2 | 1,7 | 3,8 | 2,8 | 6 сек | 6 сек |

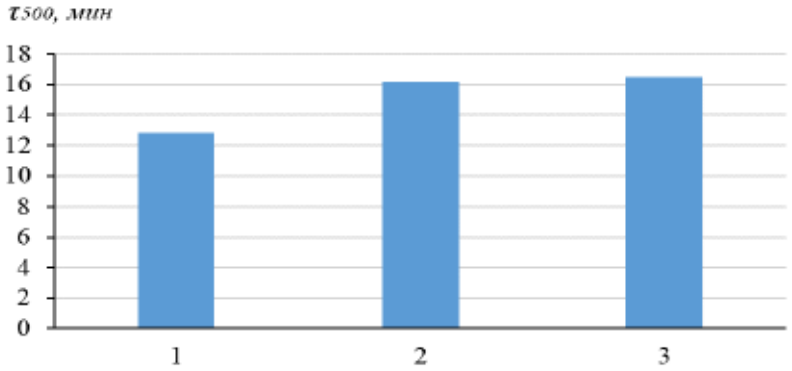



*Рисунок 5 – Время достижения предельной температуры металлической пластины при огнезащите ОВС «Термобарьер-2» на основе эпоксидных смол: 1 – контрольный образец; 2 – при модифицировании MWCNT; 3 – при модифицировании Astr*

При огневых испытаниях с немодифицированным верхом было зафиксировано возгорание ткани верхнего слоя БОП в конце 1-й минуты, а на 4-й минуте началось тление верхнего слоя. Возгорание ткани верхнего слоя БОП, модифицированного УНС, не происходило в течение всего периода испытания. При испытаниях в огневом симуляторе в течение 6 минут при температуре 450-600°С модифицированный внешний защитный слой БОП не воспламенился и сохранял свою целостность на протяжении всего периода испытания; были лишь поверхностные следы термического воздействия (локальные потемнения). Немодифицированный материал БОП получил сквозные повреждения покрытия на 3-й минуте испытаний (рис. 6).

В течение 6 минут образец боевой одежды с материалов верха, модифицированным УНС, не получил сквозных термических разрушений и не воспламенился, в то время как немодифицированный образец загорелся в течение 2 минут аналогичного теплового воздействия в огневом симуляторе.

Тестирование БОП с системой тепловой защиты показало, что применение наномодифицированных материалов позволяет увеличить время безопасного нахождения в зоне повышенных температур (рис. 7). Этот результат может быть объяснён повышенной термической стабильностью и устойчивостью к тепловому потоку модифицированного материала БОП.




*Рисунок 6 – Фотография процесса испытаний БОП в огневом симуляторе*

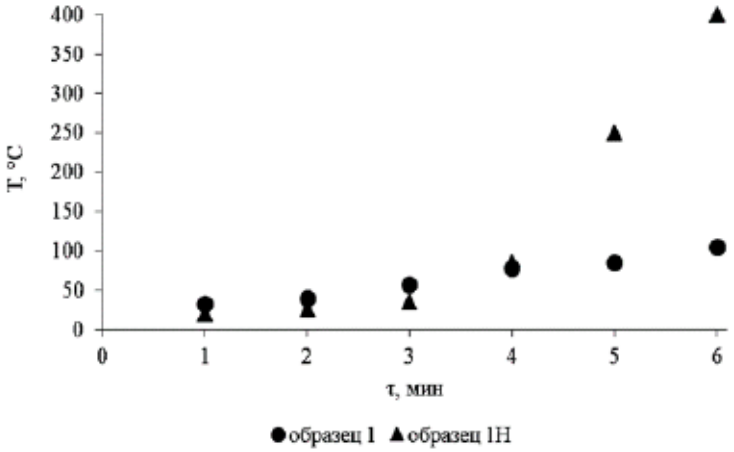



*Рисунок 7 – Показания термопар под защитным слоем БОП при испытаниях на огневом симуляторе*

При тестировании системы тепловой защиты для покрывал без модифицированных материалов зафиксировано одно успешное тушение модельного очага 21В после применения в качестве средства тепловой защиты пострадавших. При повторном применении данного покрывала происходило сквозное распространение пламени через поврежденный слой защитного покрывала. Для образца покрывал для ликвидации возгораний с модифицированным покрытием зафиксировано десять успешных повторений тушения модельного очага 21В одним изделием, в то время как стандартное покрывало выполнило функцию тушения возгорания лишь один раз (рис. 8).



*Рисунок 8 – Фотография процесса очага возгорания горючих жидкостей*

При тестировании системы тепловой защиты изделий показано, что покрывало для ликвидации возгораний выполнило свои функции в течение 1 минуты в непосредственной близости от очага 21В (рис. 9).

Для покрывала с модифицированным покрытием фиксировалось снижение скорости роста температуры на внутренней поверхности покрывала (рис. 10).



*Рисунок 9 – Фотография процесса тестирования системы защиты тела человека при самоспасании из зоны пожара*

Рамановская спектроскопия для образцов материалов на основе растительного сырья, произведенного с помощью технологий наномодифицирования, показала, что для волокон, полученных из растений, выращенных в условиях полива почвы суспензией водопроводной воды с *Astr* фиксируется характерная для графенового слоя *G*-полоса в интервале 1630-1650 $см^{-1}$, в то время как для немодифицированного волокна данная полоса не наблюдается [13] (рис. 11).

Результаты ДТА [14] свидетельствуют, что для модифицированных волокон льна характерно снижение интенсивности теплового эффекта в интервале температур 250-320°С и смещение экзотермического пика в интервале температур 450-550°С в сторону больших значений на 35°С (рис. 12).

Расчетные значения потенциального пожарного риска при использовании УНС в системах локализации аварийных проливов типового технологического процесса приведены в таблице 3.

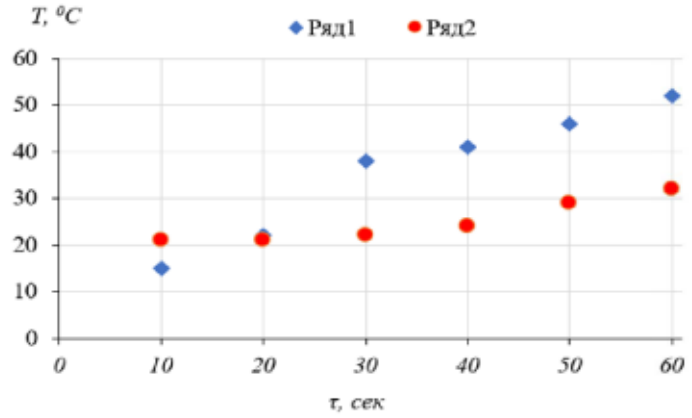



*Рисунок 10 – Результаты исследований системы тепловой защиты в условиях горения очага 21В при использовании покрывала из немодифицированных материалов (ряд 1) и покрывала с модифицированным покрытием на основе углеродных наноструктур (ряд 2)*

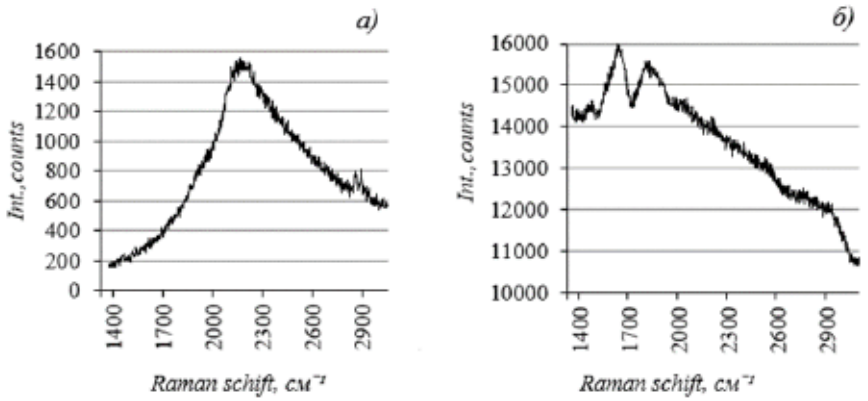



*Рисунок 11 – Рамановский спектр образцов волокон льна: контрольный образец (а) и полученный при наномодифицировании (б)*

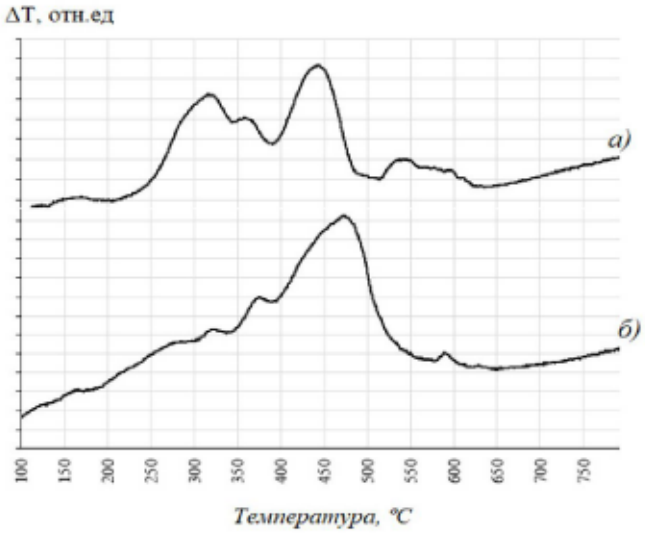



*Рисунок 12 – Результаты ДТА образцов волокон льна: контрольный образец (а) и полученный при наномодифицировании (б)*

*Таблица 3 – Расчетные значения потенциального риска и индивидуального риска на предприятии с обращением нефтепродуктов в условиях применения углеродных наномодификаторов*

| № п/п | Наименование жидкости | P(A), год$^{-1}$ |
|---|---|---|
| 1 | Этанол | $2 \cdot 10^{-7}$ |
| 2 | Этанол+MWCNT 0,5% масс. | $1{,}906 \cdot 10^{-7}$ |
| 3 | Этанол+ MWCNT 1,0% масс. | $1{,}918 \cdot 10^{-7}$ |
| 4 | о-Ксилол | $1{,}596 \cdot 10^{-7}$ |
| 5 | о-Ксилол+MWCNT 0,5% масс. | $0{,}76 \cdot 10^{-7}$ |
| 6 | о-Ксилол + MWCNT 1,0% масс. | $0{,}978 \cdot 10^{-7}$ |
| 7 | БР-1 | $2 \cdot 10^{-7}$ |
| 8 | БР-1+MWCNT 0,5% масс. | $1{,}942 \cdot 10^{-7}$ |
| 9 | БР-1+ MWCNT 1,0% масс. | $1{,}986 \cdot 10^{-7}$ |
| 10 | Уайт-Спирит | $2 \cdot 10^{-7}$ |
| 11 | Уайт-Спирит+MWCNT 0,5% масс. | $1{,}952 \cdot 10^{-7}$ |
| 12 | Уайт-Спирит + MWCNT 1,0% масс. | $1{,}844 \cdot 10^{-7}$ |

Результаты расчетов свидетельствуют об уменьшении значений потенциального риска при использовании УНС, за счет снижения вероятности поражения людей тепловым излучением при пожарах-проливах и «огненных шарах» при авариях на объектах с обращением ЛВЖ.

**Обсуждение.** Испытания установок пожаротушения показали, что огнетушащие составы с модификаторами на основе УНС обладают повышенными эксплуатационными характеристиками применительно к ликвидации горения нефтепродуктов [17, 18]. Данные по оценке защитных свойств вспучивающихся составов и материалов БОП подтверждают высокую эффективность модификаторов для повышения термостойкости защитных материалов [14]. ДТА-термограммы исследуемых образцов подтверждают возможность создания технологий производства термически стойких материалов из сырья растительного происхождения путем внедрения ингибиторов горения не только на стадии обработки готового волокна, но и в процессе роста растений.

Результаты расчетов потенциального риска на типовых объектах с обращением модифицированных органических жидкостей и нефтепродуктов позволяют сделать вывод об уменьшении вероятности поражения людей от опасных факторов пожара (избыточного давления взрыва и импульса, а также величины теплового излучения) достигаемого за счет уменьшения количества паров, образующихся вследствие аварийных проливов пожароопасных жидкостей при пожаре-проливе, образовании «огненного шара» и взрывов паровоздушных смесей [19, 20].

Полученные данные являются основанием для создания технических решений, обеспечивающих оперативное изменение свойств взрывопожароопасных жидкостей, с целью предупреждения возникновения взрывопожароопасных ситуаций на объектах хранения, транспортировки и переработки нефтепродуктов, за счет применения «умных материалов» на основе УНС [21].

Ключевыми параметрами технологий наномодифицирования для решения задач обеспечения пожарной безопасности являются:

– использование в качестве модификаторов УНС с высокой термической стабильностью;

– поддержание концентрации УНС в процессе модифицирования жидкостей в диапазоне 0,2-0,5 об.%;

– стабильность суспензий на всем технологическом цикле получения наноматериалов.

Применение «нанокомпозитного подхода» при создании материалов для обеспечения пожарной безопасности позволяет достигать необходимых эксплуатационных характеристик за счет использования термически стабильных УНС и использовании стабилизаторов дисперсий. Использование УНС в малых концентрациях не приводит к значительному изменению плотности и вязкости жидкостей, использующихся при создании новых материалов, а значит, не требует модернизации существующего производственного оборудования, что повышает конкурентоспособность производства.

**Выводы.** Полученные при реализации «нанокомпозитного подхода» практические решения по обеспечению пожарной безопасности позволяют сделать вывод о необходимости развития нового направления в области создания наноматериалов, имеющего значительные преимущества для практического применения обеспечения пожарной безопасности на объектах НГК:

1. Разработка рецептур наномодифицированных огнетушащих составов позволяет повысить эффективность огнетушащих составов за счет сокращения времени тушения и минимизации ущерба от пожара при его ликвидации на начальной стадии, там самым обеспечивая повышения общей защищенности промышленных объектов от пожаров и аварий.

2. Применение наномодифицированных материалов в БОП, индивидуальных систем тепловой защиты и средств ликвидации аварийных проливов нефтепродуктов снижает риск поражения ОФП участников тушения пожара и персонала объекта, что в конечном счете ведет к уменьшению затрат

на медицинское обеспечение и страховые выплаты сотрудникам предприятий НГК.

3. Применение «нанокомпозитного подхода» позволяет создавать сорбенты для ликвидации аварийных проливов нефтепродуктов, существенно сокращающие выход горючего вещества в газовую фазу, тем самым снижая интенсивность воздействия ОФП при аварийных ситуациях на объектах НГК.

4. Необходимо дальнейшее проведение исследований с целью создания новых материалов для обеспечения пожарной безопасности производственных процессов различных отраслей экономики страны.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Николайчик Ю.А. и др. Общие проблемы развития и внедрения наноматериалов и нанотехнологий // Литьё и металлургия. – 2020. – №. 4. – С. 152-162.

2. Тебекин А.В. Перспективы развития национальной экономики в рамках шестого технологического уклада с учетом ужесточения западных санкций // Журнал исследований по управлению. – 2022. – Т. 8. – №. 1. – С. 17-37.

3. Thomas S., Rouxel D., Ponnamma D. (Eds.) Spectroscopy of Polymer Nanocomposites. Elsevier, 2016. – 484 p.

4. Рамбиди Н., Берёзкин А. Физические и химические основы нанотехнологий. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009 – 456 с.

5. Shames A.I., Katz E.A., Panich A.M., Mogilyansky D., Mogilko E., Grinblat J., Belousov V.P., Belousova I. M., Ponomarev A. N. Structural and magnetic resonance study of astralen nanoparticles// Diamond and Related Materials. 2009. – Vol. 8. – No. 2-3. – P. 505-510.

6. Olawoyin R. Nanotechnology: The future of fire safety // Safety science. – 2018. – Т. 110. – С. 214-221. DOI: 10.1016/j.ssci.2018.08.016.

7. Пустовалов И.А. Экспериментальное исследование огнетушащей способности модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой, модифицированной астраленами. Пожаровзрывобезопасность. 2021. – Т. 30. – №.5. – С. 84-97. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.05.84-97.

8. Киселева В.С. Разработка наномодифицированного огнетушащего состава для роботизированных установок пожаротушения на объектах транспортировки нефтепродуктов // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2023. – №. 3. – С. 196-203. DOI: https://doi.org/10.61260/1998-8990-2023-3-196-203.

9. Иванов А.В., Торопов Д.П., Медведева Л.В., Калинина Е.С. Физический механизм и способ тушения жидких углеводородов модифицированными суспензиями воды с углеродными наноструктурами//Пожаровзрывобезопасность/ Fire and explosion safety. – 2019. – Т. 28. – №1. – С. 22-34. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.01.22-34.

10. Кисляков Р.А., Зелинская И.А., Иванов А.В. Модификация материалов верха боевой одежды пожарного астраленами //Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). – 2021. – №. 2. – С. 41-44.

11. Иванов А.В. и др. Модификация тонкослойных огнезащитных покрытий многослойными углеродными нанотрубками: физико-технологические принципы и методика применения для объектов трубопроводного транспорта // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. – 2019. – Т. 28. – №. 5. – С. 39-50. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.05.39-50.

12. Иванов А.В. и др. Управление электростатическими свойствами жидких углеводородов, модифицированных углеродными наноструктурами //Пожаровзрывобезопасность. – 2017. – Т. 26. – №. 7. – С. 16-27. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.07.16-27.

13. Яковлев Г.И. и др. Модификация огнезащитного силикатного покрытия углеродными нанотрубками // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2013. – №. 5. – С. 49-51.

14. Москалюк О.А. и др. Апробация образцов тканей, модифицированных углеродными наноструктурами в составе боевой одежды пожарного в рамках опытно-исследовательских учений «Безопасная Арктика-2023» // Пожарная безопасность: современные вызовы. проблемы и пути решения. – 2023. – С. 163-168.

15. Баннов А.Г., Попов М.В., Курмашов П.Б. Термический анализ углеродных наноматериалов: преимущества и проблемы интерпретации // Журнал термического анализа и калориметрии. – 2020. – Т. 142. – №. 1. – С. 349-370.

16. Butler H.J. et al. Using Raman spectroscopy to characterize biological materials // Nature protocols. – 2016. – Т. 11. – №. 4. – С. 664-687. DOI: 10.1038/nprot.2016.036.

17. Ponomarev A.N. et al. Investigation of extinguishment process of liquid hydrocarbon flames by aqueous suspensions of astralenes // Fire Technology. – 2021. – V. 57. – N. 4. – P. 2061-2075.

18. Иванов А.В. Тушение модельных очагов класса «В» наномодифицированными огнетушащими составами: Закономерности и эффекты // Техносферная безопасность. – 2022. – № 4 (37). – С. 34-44.

19. Иванов А.В. и др. Научно-методические основы управления свойствами наножидкостей при обеспечении пожарной безопасности и тушении пожаров на предприятиях нефтегазового комплекса // Техносферная безопасность. – 2018. – № 2 (19). – С. 98-108.

20. Иванов А.В. и др. Реализация технологии управления свойствами наноструктур в жидких углеводородах для снижения пожарного риска на объектах нефтегазового комплекса // Техносферная безопасность. – 2019. – №. 2. – С. 49-57.

21. Иванов А.В. Применение «нанокомпозитного подхода» при создании огнезащитных вспучивающихся составов // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2023. – № 1 (65). – С. 39-47.

*Статья поступила в редакцию 31.10.2024*
*Статья принята к публикации 13.12.2024*

УДК 504.05:662.6
EDN: MFEYAI

# АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОРФЯНОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ВОДОРОДА

© Авторы 2024
SPIN: 6582-8074
AuthorID: 161099
ORCID: 0000-0002-1388-8649
ScopusID: 57190860772

**ЧУСОВ Александр Николаевич**, кандидат технических наук, доцент,
доцент высшей школы гидротехнического и энергетического строительства
*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*
*(195251, Россия г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, chusov17@mail.ru)*

SPIN: 9964-2034
AuthorID: 439213
ORCID: 0000-0002-5914-6210
ScopusID: 57220085642

**ПОЛИТАЕВА Наталья Анатольевна,** доктор технических наук, профессор,
профессор высшей школы гидротехнического и энергетического строительства
*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*
*(195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, politaevana1971@gmail.com)*

SPIN: 1159-95606
AuthorID: 109785
ORCID: 0000-0002-7151-5998
ScopusID: 56225536000

**РОМАНОВ Михаил Васильевич,** кандидат технических наук, доцент,
доцент высшей школы гидротехнического и энергетического строительства
*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*
*(195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, rom@spbstu.ru)*

SPIN: 1182-6164
AuthorID: 678290
ORCID: 0000000295587005
ScopusID: 57192975132

**ЩУР Александр Васильевич,** доктор биологических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Техносферная безопасность»
*Белорусско-Российский университет*
*(212000, Республика Беларусь, г. Могилев, проспект Мира, 43. Shchur@yandex.by)*

**Аннотация**. В статье изложены принципы ресурсосбережения и основные принципы геотехнологических решений использования местных природных материалов и отходов для производства экологически чистого биотоплива в виде энергопеллет, востребованных в современной малой энергетике. Сокращение и отказ от использования энергоносителей на основе ископаемого топлива определяют новые тренды в технологиях производства энергии. В настоящее время, когда наблюдается рост энергопотребления из-за роста численности народонаселения планеты, расширения энергоемких производственных отраслей, возникает необходимость поиска альтернативных источников энергии. При сжигании ископаемого топлива в атмосферу поступают парниковые и токсичные газы, вызывающие глобальное потепление и кислотные дожди. Учеными всего мира предпринимаются постоянные усилия по поиску чистых, возобновляемых альтернатив для устойчивого развития. Биомасса является одним из самых распространенных возобновляемых ресурсов, к которым относится и торфяное сырье. Это сырье образуется путем фиксации углекислого газа в атмосфере в процессе фотосинтеза растений и, следовательно, является углеродно-нейтральным в своем жизненном цикле. В настоящее время биомасса обеспечивает около 12% мирового энергоснабжения, а в некоторых развивающихся странах она обеспечивает 40-50% энергоснабжения. Проведен анализ и дана оценка современным подходам в использовании торфяного сырья для производства экологически чистого топлива - водорода.

**Ключевые слова:** биоэнергетика, геоэкология, возобновляемые источники энергии, торфяное сырье, водород.

# ANALYSIS AND ASSESSMENT OF THE POSSIBILITIES OF USING PEAT RAW MATERIALS FOR HYDROGEN PRODUCTION

© The Authors 2024

**CHUSOV Aleksandr Nicolaevich**, candidate of technical sciences, associate professor,

associate professor of the Higher School of Hydrotechnical and Power Engineering
*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*
*(195251, Russia, St. Petersburg, st. Politekhnicheskaya, 29, chusov17@mail.ru)*
**POLITAYEVA Natalya Anatolyevna**, doctor of technical sciences, professor,
professor of the Higher School of Hydrotechnical and Power Engineering
*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*
*(195251, Russia, St. Petersburg, st. Politekhnicheskaya, 29, politaevana1971@gmail.com)*
**ROMANOV Mikhail Vasilievich**, candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the Higher School of Hydrotechnical and Power Engineering
*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*
*(195251, Russia, St. Petersburg, st. Politekhnicheskaya, 29, rom@spbstu.ru)*
**SHUR Alexander Vasilievich**, doctor biological sciences, associate professor
head Department of "Technosphere Safety"
*Belarusian-Russian University*
*(212000, Republic of Belarus, Mogilev, Mira Avenue, 43. Shchur@yandex.by)*

**Abstract.** The article outlines the principles of resource conservation and the basic principles of geotechnological solutions for the use of local natural materials and waste for the production of environmentally friendly biofuel in the form of energy pellets, which are in demand in modern small-scale power generation. The reduction and elimination of fossil fuel-based energy sources are defining new trends in energy production technologies. Currently, when there is an increase in energy consumption due to the growth of the human population and the expansion of energy-intensive manufacturing industries, there is a need to search for alternative energy sources. Burning fossil fuels releases greenhouse and toxic gases into the atmosphere, causing global warming and acid rain. Scientists around the world are constantly working to find clean, renewable alternatives for sustainable development. This raw material is formed by fixing carbon dioxide in the atmosphere during plant photosynthesis and is therefore carbon neutral in its life cycle. Currently, biomass provides about 12% of the world's energy supply, and in some developing countries it provides 40-50% of the energy supply. An analysis and assessment of modern approaches to the use of peat raw materials for the production of environmentally friendly fuel (hydrogen) is carried out.

**Keywords:** bioenergy, geoecology, renewable energy sources, peat raw materials, hydrogen.

*Для цитирования: Чусов А.Н. Анализ и оценка возможностей использования торфяного сырья для производства водорода / А.Н. Чусов, Н.А. Политаева, М.В. Романов, А.В. Щур // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 4(68). – С. 309-314. – EDN: MFEYAI.*

**Введение.** Органогенные местные природные ресурсы, отнесенные по недропользованию к общераспространенным полезным ископаемым (сланец, торф, сапропель и др.) совместно с отходами местной промышленности (древесные опилки, стружка и т.п.) в контексте классификации энергетических и сырьевых ресурсов (рис. 1) можно отнести к возобновляемым источникам энергии. При лавинообразном накоплении отходов и приросте органики (торф 250 млн. т в год, сапропель более 50 млн. т в год, при добыче и использовании для различных целей, в том числе и энергетических, не более 5 млн. т). В соответствие с концепцией развития энергетики Европейского Союза основными направлениями энергетического использования торфа являются: 1) производство композиционного коммунально-бытового биотоплива (КББТ); 2) газификация и пиролиз торфа; 3) производство биоэтонола; 4) производство водорода. Согласно прогнозу, потребление биотоплив в Европе будет увеличиваться и к 2030 г. составит более 70,0 млн. т нефтяного эквивалента/год [1-8].

Целью данной работы стало обобщение и анализ технологических инновационных решений переработки торфяного сырья, а также мировых тенденций развития возобновляемой энергетики.

**Методология.** Торфяные энергопеллеты могут быть произведены по технологии, которая представлена в виде упрощенной схемы (рис. 2). В состав органических отходов входят торф и древесные опилки, а сапропель используется в качестве модификатора и структурообразователя.

Характеристика энергопеллет, полученных таким образом, следующая: плотность – 500-700 кг/м$^3$; энергосодержание – 17-21 МДж/кг; длина до от 12 до 50 мм; диаметр от 8 до 20 мм; влажность – 12-30%; содержание утилизируемой в качестве удобрения золы – 0,5 – 4,0% [9-12]. Сжигание 2-3м$^3$ композиционного ККБТ в виде торфяных энергопеллет эквивалентно по энергосодержанию 1 м$^3$ нефти. При этом себестоимость одной тонны ККБТ составляет 50 – 90 €. Если сравнивать энергосодержание различных биотоплив при их прямом сжигании, то очевидна следующая тенденция роста, представленная на диаграмме (рис. 3). Торфяные энергопеллеты в виде ККБТ имеют теплотворную способность в 1,7 раза большую, чем щепа, и в 1,1 раз, чем самые эффективные древесные энергопеллеты [13-16].

Производство горючего газа и жидкого моторного топлива методом газификации с последующим синтезом $CO$ и $H_2$ жидких углеводородов и спиртов или каталитический синтез жидкого топлива на па-

ровоздушной смеси (получение метанола $CH_3OH$) становится все более актуальным. Причиной этого являются как высокая ценовая политика на нефть и растущие требования к экологической чистоте моторных топлив, так и возрастающее потребление его в качестве энергетических элементов повышенной емкости.

Необходимо заметить, что процесс газификации торфа в значительных объемах осуществлялся в России еще в первой половине XX-го века. В основе технологического процесса газификации лежит способность органической части твердого топлива переходить при определенных условиях из твердого состояния в газообразное с образованием монооксида углерода и водорода. Однако теплотворная способность получаемой газовой смеси получается относительно невысокая. Кроме того, имеется существенное ограничение: влажность торфа, используемого для газификации, не должна превышать 42%.

Технологии быстрого пиролиза при скорости нагрева (103 град/с) характеризуется значительно большей скоростью разрыва межмолекулярных связей. Сжигание ККБТ (в виде энергопеллет) по технологии быстрого пиролиза, позволяет резко увеличить выход органической компоненты и повысить степень связывания $SO_2$ на поверхности $CaO$ до 60%. При добавках карбонатного сапропеля степень связывания диокси-да серы увеличивается до 90%, что исключает образование кислотных осадков. Метод быстрого пиролиза позволяет получить выход жидкого и газообразного метанола более 40% (по сравнению с 12-14% при обычном методе).

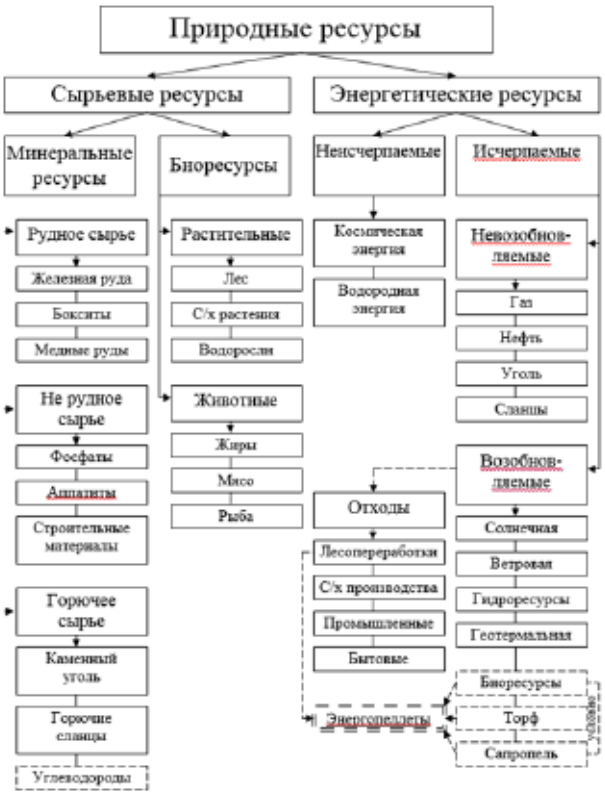



*Рисунок 1 – Классификация природных сырьевых и энергетических ресурсов*

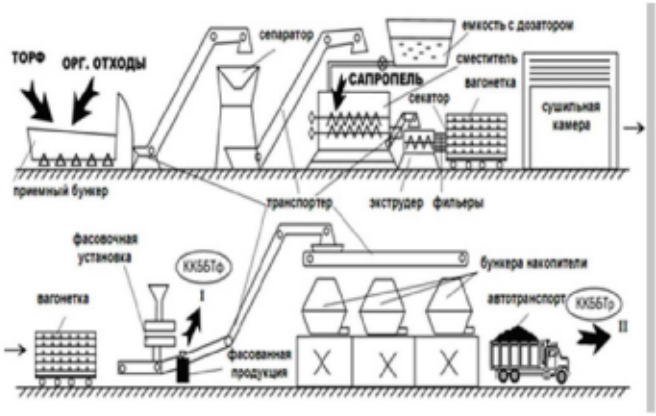



*Рисунок 2 – Схематическое изображение процесса производства комплексного коммунально-бытового биотоплива*

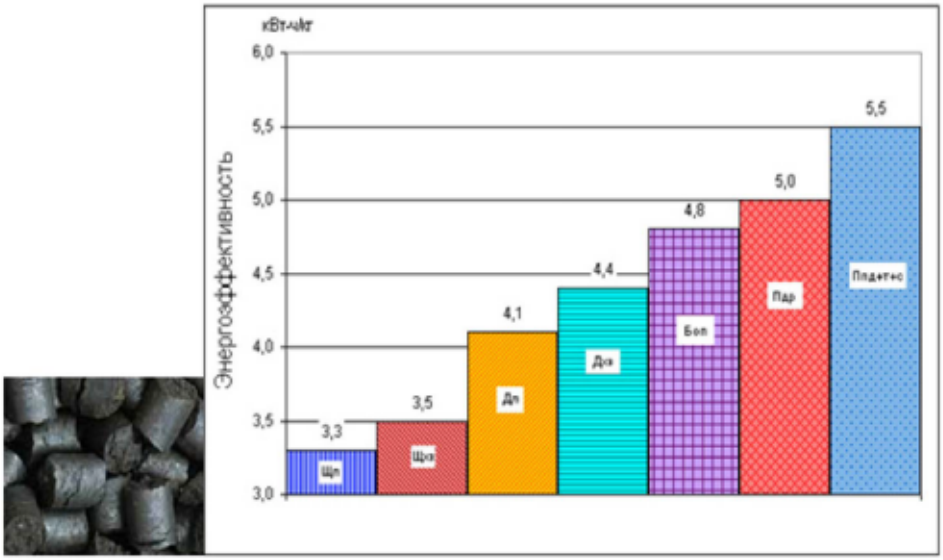



*Рисунок 3 – Энергоэффективность различных видов биотоплива ($Щ_л$ – щепа лиственных пород, $Щ_{хв}$ – щепа хвойных пород, $Д_л$ – дрова лиственных пород, $Д_{хв}$ – дрова хвойных пород, $Б_{оп}$ – брикет из опилок, $П_{др}$ – пеллеты из древесных отходов, $П_{др+т+с}$ – пеллеты из древесных отходов, торфа и сапропеля)*

**Результаты.** Среди существующих технологий газификатор Техасо, по нашему мнению, является наиболее многообещающей новой системой газификации с вовлеченным слоем [11, 12]. Анализ имеющегося опыта сжигания торфа в промышленных объемах, указывает на то, что «облагороженное» местное торфяное топливо превосходит по теплоте сгорания древесину и приближается к привозному углю. Безусловно следует учитывать и экологическую составляющую: так как при сжигании каменного и бурого угля, горючего сланца и мазута выбросы в атмосферу оксидов углерода, серы и азота возрастают от 2,5 до 36 раз по сравнению с использованием ККБТ. Кроме того, согласно подсчетам экспертов, разработка одного гектара торфяного месторождения спасает от вырубки до 100 гектаров леса. Плата за выбросы и затраты на утилизацию угольной золы в 5-7 раз больше, чем торфяного топлива в виде энергопеллет. Таким образом, использование композитных энергопеллет как местного топлива для коммунально-бытовых нужд экологически целесообразно и экономически выгодно [13-16].

В результате проведенного анализа, по нашему мнению, особо перспективной является технология получения высокочистого водорода из торфяного метанола (рис. 4). Установлено, что из 0,5 кг метанола можно получить до 1 м$^3$ высокочистого водорода. Причем, способ получения $H_2$ из $CH_3OH$ превосходит по простоте и экономичности обычный способ получения водорода из аммиака путем его разложения.

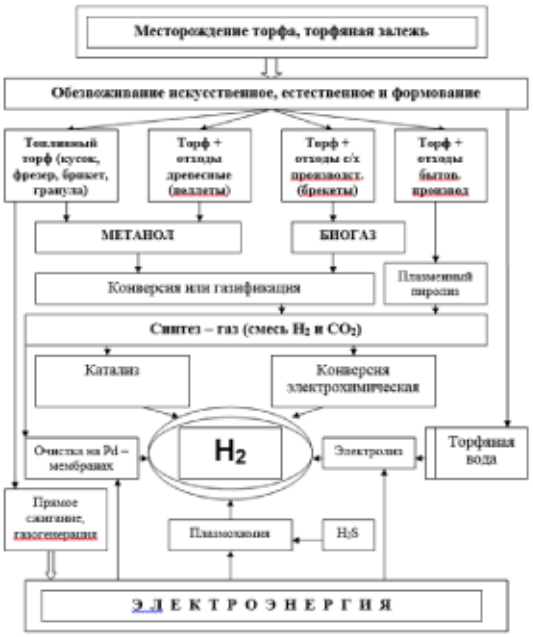



*Рисунок 4 – Схема производства водорода на основе термической и электрохимической переработки торфа*

Риформинг угля и природного газа требуют потребления кислорода из атмосферы. Поэтому такие технологии не являются экологически обоснованными. Между тем, электролиз воды с использованием протонных мембран для электролизёров нового типа, позволяет извлекать молекулярный кислород – главное недостающее звено водородной энергетики будущего, с последующим возвращением его в окружающую среду. В случае увеличения добычи и прямого сжигания органического топлива до 20 млрд. т. условного топлива ежегодно, промышленное потребление кислорода из атмосферы возрастет примерно до 50 млрд. т. Подобное воздействие, в совокупности с естественным потреблением кислорода, превысит нижнюю границу его воспроизводства в природе. Следует заметить, что эта граница уже давно пройдена во многих промышленно развитых странах [11, 17].

**Обсуждение.** Очевидно, что для производства водорода используется широкий спектр сырья, разработаны многочисленные технологии, но выбор технологии производства на данный момент зависит, прежде всего, от наличия сырья и общей стоимости.

Рассматривая возможность получения топлива третьего тысячелетия, на основе преобразованного и подвергнутого искусственной сушке торфяного сырья, можно выделить несколько основных путей получения технического водорода: 1) брожением сырья в виде мелассы (выход водорода при схеме ацетонобутилового брожения из 1 т мелассы от 50 до 100 м³); 2) электролизом дисперсной среды (торфяной воды) при использовании электроэнергии и специальных электродов (очень дорогой метод); 3) каталитическим преобразованием синтез-газа, получаемого при сжигании ККБТ (себестоимость производства около 1,5 € за кг при себестоимости энергопеллет более 50 € за тонну); 4) разделением синтез-газа на палладиевых мембранах (перспективный, но пока еще не полностью отработанный в производстве метод); 5) получением из водного раствора этанола $C_2H_5OH$ (99% превращение при 75% конверсии энергии); 6) преобразованием на основе пиролиза и катализа метанола $CH_3OH$ (стоимость значительно ниже, чем широко применяемая в химической отрасли паровая конверсия метана).

С физико-химических позиций торф – это сложная многокомпонентная, полидисперсная и полифракционная, полуколлоидная высокомолекулярная система. Дисперсионная среда – торфяная вода при искусственном, механическом обезвоживании торфа представляет собой полиэлектролит, включающий соединения в виде гуминовых веществ, диссоциированных ионов водорода и поглощенных ионов, имеющих электрический заряд на поверхности агрегатов и представляющих собой мозаичные микродиффузионные ионные слои. В органической части торфа основным его горючим элементом является углерод (удельная теплота сгорания 34 МДж/кг). Водород, входящий в состав углеводородов различных органогенных топлив (табл. 1), представляет второй по значению горючий элемент с более значительной удельной теплотой сгорания 278 МДж/кг и абсолютной экологической чистотой при использовании.

Известные технологии производства технического водорода из торфа примерно в 3-3,5 раза более энергоемкие, чем из нефти на единицу веса. Однако, учитывая, что только в России накапливается ежегодно 250 млн. т торфа, а добывается и перерабатывается около 2 млн. т, торф следует отнести к широко распространенным и, самое главное, возобновляемым источникам энергии [14, 19]. Кроме того, в процессе сгорания он практически не дает выбросов оксидов углерода и серы в атмосферный воздух (в отличие от нефти, мазута, угля и др.). Особенно ярко это проявляется при сжигании торфа в сочетании с другими отходами, благодаря процессам синергизма, в которых торф является субстанцией, связывающей токсичные газы.

Таким образом, процесс термической утилизации ряда отходов становиться более экологически безопасным [3, 4, 17].

*Таблица 1 – Средние значения элементного состава горючих полезных ископаемых*

| Вид топлива | Состав горючей массы на органическое вещество, % | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Углерод, С | Водород, Н | Кислород, О | Сера, S |
| Нефть | 83,8 | 12,0 | 0,2 | 4,0 |
| Антрацит | 92,0 | 2,0 | 2,0 | 4,0 |
| Сапропель | 57,0 | 7 (11) | 33,8 | 2,2 |
| Торф | 58,0 | 6(11) | 35,7 | 0,3 |

*(11) – содержание водорода в дисперсионной (водной) среде*

**Выводы.** Анализ структуры производства энергии в мире показывает, что в экономически развитых странах наблюдаются тенденции отказа от использования ископаемых топлив, в том числе от торфа, как источника ископаемого энергетического сырья. Повсеместно большинство развитых стран стремятся к углеродно-нейтральному производству энергии, продолжая инвестировать в производство чистой возобновляемой энергии. Водород признан одним из самых перспективных энергоносителей

в ближайшем будущем. Существенным отличием получения водорода из различных углеводородов (угля, нефти и др.) является тот факт, что для очистки газов от сероводорода при сжигании и переработке угля и нефти требуется дополнительный и энергоемкий процесс, основанный на плазменной химии. В то же время синтез-газ, получаемый из различных торфов, практически не содержит $H_2S$ (или содержит в ничтожно малых количествах) по сравнению с углем, нефтью и, особенно, горючими сланцами.

В современных условиях производство водорода обходится дороже, чем существующее ископаемое топливо, но в будущем этот подход изменится, если будет взиматься существенный налог на выбросы углерода. Поскольку водород может быть произведен из торфяного сырья, энергетическая безопасность может быть повышена за счет диверсификации производственных технологий. Выбор же технологии производства водорода зависит, прежде всего, от наличия сырья и общей стоимости производства энергии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Renewables Global Status Report 2023. URL: https://www.ren21.net/wpcontent/uploads/2019/05/GSR2023_Full_Report.pdf (дата обращения 13.08.2023).

2. Exxon Mobil. Outlook for Energy: A perspective to 2040. URL: https://www.ief.org/_resources/files/events/ief-lecture-exxonmobils-2019-outlook-for-energy-a-perspective-to-2040/exxonmobil-2019-outlook-for-energy-a-perspective-to-2040.pdf (дата обращения 04.12.2024).

3. Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Энергоэффективность и развитие энергетики: Постановление Правительства Рос.Федерации от 15 апр.2014 г. №321: [с изменениями]. – Текст: электронный // Правительство России: [сайт]. – URL: http://government.ru/docs/all/91334/ (дата обращения: 04.12.2024).

3. Косов В.И. Биосферные процессы и их экологические риски – научная основа создания инновационных технологий разработки торфяных месторождений и получения энергопродукции. Материалы 8-ой международной конференции: «Новые идеи в науках о Земле». М.: РГГРУ. – Т.7. – 2007. – С.302-305.

4. Косов В.И., Васильев А.Н. Расчет выбросов в атмосферу при различных технологиях добычи торфа // Горный информационно-аналитический бюллетень. М.: МГГУ. – №3. – 2001. – С. 214-221.

5. Абдуллаев Д.А. ВИЭ как потенциальный тренд развития ТЭК РФ // Colloquium-journal. – 2019. – №21-6. – С. 68-70.

6. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года. Утв. распоряжением Правительства РФ от 13 ноября 2009 г. №1715-р. – 144 с.

7. Концепция охраны и рационального использования торфяных болот России / под общ. ред. чл.-корр. РАСХН Л.И. Инишевой. – Томск: ЦНТИ, 2005. – 97 с.

8. Методика измерений массовой доли органического углерода в торфах, сапропелях, лесных подстилках, органических удобрениях, почвах фотометрическим методом. – Лабораторно-аналитический центр. – Томск, 2015.

9. Патент РФ № 2274866. Способ по производству продукции, тепла и электроэнергии из торфа и технологический комплекс для его осуществления (авт. В.И. Косов, Д. Ю. Гогин), М.: ФИПС, 2007.

10. Патент РФ № 2296743. Комплекс для добычи полезных ископаемых, в частности торфа (авт. В.И. Косов, А.С. Беляков), М.: ФИПС, 2007.

11. Торф (ресурсы, технологии, геоэкология) // Под ред. В.И. Косова. Санкт-Петербург: Наука. 2007. – 453с.

12. Kosov V. Ecological and Regional Aspects of Use of Peat and Sapropel in Russia//Wise Use of Peatlands.12th International Peat Congress. Tampere. Finland. – 2004. – V.1. – P.48-49.

13. Бамбалов Н.Н. Выделение компонентов при групповом анализе органического вещества торфа / Н.Н.Бамбалов // Химия твердого топлива. – 2020. – №5. – С. 31-50.

14. Косов В.И. От геоэкологии до нанотехнологий. Композитные строительные и топливно-энергетические материалы из органогенных горных пород и отходов / В.И.Косов, А.П. Золотухин. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2010. – 368с.

15. Kosov V. Natural and anthropogenic factor of origin, prevention and elimination of peat fires // Fires at natural areas of Finland and North-West Russia. Proceedings of the international and practical conference. S.-P. 2010. P. 255-259.

16. Бабичева Л.К. Развитие микрогенерации на основе ВИЭ как фактор декарбонизации и экономического роста в России / Бабичева Л.К., Непринцева Е.В., Шубин С.А. // Стратегические решения и риск-менеджмент. – 2021. – Т.12, №3. – С. 236-241.

17. Романов М.В., Чусов А.Н., Щур А.В. и др. Основы общей и прикладной экологии: учебное пособие / М.В. Романов [и др.]. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – 171 с.

18. Венцюлис Л.С. Твердые коммунальные отходы – Одна из основных экологических проблем России / Л.С. Венцюлис, А.Н. Чусов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. – 208 с.

19. Венцюлис Л.С. Энергоресурсосбережение как основная проблема топливно-энергетического комплекса России / Л.С. Венцюлис, Ю.И. Скорик, А.Н. Чусов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 239 с.

***Работа выполнена за счет средств госзадания по теме «Реализация комплекса мер по повышению эффективности деятельности Российско-Армянского (Славянского) и Белорусско-Российского университетов».***

*Статья поступила в редакцию 18.11.2024*
*Статья принята к публикации 13.12.2024*

УДК 004.942
EDN: MPHCQY

# ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПОДБОРЕ ОЧИСТИТЕЛЕЙ БАЛЛАСТНЫХ ВОД К ЗАДАННЫМ ЗАГРЯЗНИТЕЛЯМ

© Автор(ы) 2024

SPIN: 8172-0822
AuthorID: 1058664
ORCID: 0009-0008-3733-8108

**ЦЫГУТА Анна Николаевна,** аспирант
*Волжский государственный университет водного транспорта*
*(603950, Россия, город Нижний Новгород, улица Нестерова, 5, e-mail: anna.tsyguta@mail.ru)*

SPIN: 8314-6251
AuthorID: 620707
ORCID: 0000-0002-7181-2845

**ГОЛОВАЦКАЯ Леся Ивановна,** кандидат технических наук, доцент,
профессор кафедры «Математические и естественнонаучные дисциплины»
*Каспийский институт морского и речного транспорта им. ген.-адм. Ф.М. Апраксина – филиал ВГУВТ*
*(603950, Россия, город Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: lesy_g@mail.ru)*

SPIN: 5887-4715
AuthorID: 588682
ORCID: 0000-0003-2620-6915

**ДЖАЛМУХАМБЕТОВА Елена Азатуллаевна,** кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры «Математические и естественнонаучные дисциплины»
*Каспийский институт морского и речного транспорта им. ген.-адм. Ф.М. Апраксина – филиал ВГУВТ*
*(603950, Россия, город Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: lesy_g@mail.ru)*

**Аннотация.** Изучение существующего программного обеспечения для моделирования процесса очистки балластных вод от загрязнителей и разработка программного комплекса для подбора очистителей, соответствующих определённым загрязнителям балластных вод. Подбор веществ-очистителей основан на квантово-химических расчётах молекулярных структур, осуществляемых численными методами, применяемыми для поиска равновесной геометрии молекулы в основном состоянии. Проведён анализ компьютерных программ, позволяющих моделировать и анализировать состав воды, оценивать параметры различных физических, химических и биологических процессов очистки воды, моделировать изменения показателей качества воды, включая процессы удаления азота и фосфора, создавать наглядные графики и диаграммы с данными о качестве воды. Выявлена необходимость разработки собственного программного обеспечения с интеграцией существующих приложений. Предлагается создать и использовать базу данных (БД), содержащую информацию об очистителях и основных загрязняющих балластные воды веществах. Представлена структура и схема работы программного комплекса для целенаправленного поиска очистителей для заданных загрязняющих веществ. Программный комплекс может стать основой для разработки новых высокотехнологичных продуктов для фильтрации воды. Информация из БД может оптимизировать процессы проверки контроля качества фильтров, повысить безопасность и эффективность. Производители фильтров могут использовать базу для оптимизации выбора компонентов и прогнозирования новой структуры фильтров. Программный комплекс может быть использован в образовательных целях, включая обучение и повышение квалификации в области экологической безопасности, а также аналитической химии.

**Ключевые слова:** балластные воды, межмолекулярное взаимодействие, оптимизация энергии, очистители, загрязнители, схема работы программного комплекса.

# THE USE OF COMPUTER TECHNOLOGY IN THE SELECTION OF BALLAST WATER PURIFIERS FOR SPECIFIED POLLUTANTS

© The Author(s) 2024

**TSYGUTA Anna Nikolaevna,** graduate student
*Volga State University of Water Transport*
*(603951, Russia, Nizhny Novgorod, Nesterova street, 5, e-mail: anna.tsyguta@mail.ru)*

**GOLOVATSKAYA Lesya Ivanovna,** ph.d. in engineering science, associate professor,
professor of the Department of Mathematics and Natural Sciences
*Caspian Institute of Sea and River Transport named after Gen.-Adm. F. M. Apraksin is a branch of*
*Volga State University of Water Transport*
*(603951, Russia, Nizhny Novgorod, Nesterova street, 5, e-mail: lesy_g@mail.ru)*

**DZHALMUKHAMBETOVA Elena Azatullaevna,** ph.d. of physical and mathematical science,
associate professor of the department of Mathematics and Natural Sciences

*Caspian Institute of Sea and River Transport named after Gen.-Adm. F. M. Apraksin is a branch of Volga State University of Water Transport*
*(603951, Russia, Nizhny Novgorod, Nesterova street, 5, e-mail: elena_jalm@mail.ru)*

**Abstract.** The study of existing software for modeling the process of cleaning ballast water from pollutants and the development of a software package for the selection of cleaners corresponding to certain pollutants of ballast water. The selection of purifying substances is based on quantum chemical calculations of molecular structures carried out by numerical methods used to find the equilibrium geometry of a molecule in the ground state. The analysis of computer programs allowing to model and analyze the composition of water, to evaluate the parameters of various physical, chemical and biological processes of water purification, to simulate changes in water quality indicators, including nitrogen and phosphorus removal processes, to create visual graphs and diagrams with data on water quality. The need to develop our own software with the integration of existing applications has been identified. t is proposed to create and use a database containing information about purifiers and the main pollutants of ballast water. The structure and operation scheme of the software package for the targeted search of cleaners for specified pollutants are presented. The software package can become the basis for the development of new high-tech products for water filtration. Information from the database can optimize filter quality control verification processes, improve safety and efficiency. Filter manufacturers can use the database to optimize the selection of components and predict the new filter structure. The software package can be used for educational purposes, including training and advanced training in the field of environmental safety, as well as analytical chemistry.

**Keywords:** ballast water, intermolecular interaction, energy optimization, purifiers, pollutants, block scheme of the software package.

*Для цитирования: Цыгута А.Н. Применение компьютерных технологий при подборе очистителей балластных вод к заданным загрязнителям / А.Н. Цыгута, Л.И. Головацкая, Е.А. Джалмухамбетова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – № 4(68). – С. 315-320. – EDN: MPHCQY.*

**Введение.** В современном мире проблема загрязнения окружающей среды становится всё более актуальной и требует постоянного внимания, а также поиска новых технологий для очистки. Одним из основных источников загрязнения морских и речных экосистем являются балластные воды, которые используются для стабилизации судов во время плавания. Они могут содержать в себе различные загрязнители, такие как органические и неорганические соединения, тяжёлые металлы, нефтепродукты и живые микро- и макроорганизмы (инвазивные виды) [1]. Важность исследований морских происшествий для повышения безопасности морского судоходства и снижения негативного воздействия на окружающую среду изучается в исследованиях ученых [2]. Проводятся активные исследования, связанные с оценкой параметров разлива нефти и нефтепродуктов, а также созданием математических моделей нефтяного загрязнения [3]. Рассматриваются различные подходы, которые позволяют повысить эффективность управления рисками и уменьшить вероятность возникновения аварий и чрезвычайных ситуаций на производстве [4].

**Методология.** В последние годы цифровые технологии и разработка моделей приобретает всё большее значение в области охраны окружающей среды. Преимуществом цифровых моделей является возможность сокращения времени, которое обычно требуется для проведения экспериментов и тестирования реальных систем. Исследователи могут рассчитать и составить математическую модель развития событий, либо смоделировать в программе цифровую версию системы.

Данные методы сохраняют приемлемый уровень точности и приближённости к реальным условиям. Примером таких технологий может служить программа моделирования анализа качества воды *WASP* (*Water Quality Analysis Simulation Program*) [5]. Данная программа может быть применена для решения различных задач управления водными ресурсами, включая моделирование одномерных, двухмерных и трёхмерных водных объектов, а также может дать оценку различных параметров физических, химических и биологических процессов. Пользователь во входных параметрах определяет являются ли процессы стационарными или нестационарными, а также выявляет какого характера сброс: точечным или неточечным. В результате работы программы пользователь имеет возможность определить соответствует ли нормам полученный показатель. На данный момент программа была применима к более чем двадцати проблемам управления водными ресурсами. Программа уже применена для анализа качества воды в бухте Мобил, расположенной в Мексиканском заливе [6]; пресноводном озере Мичиган [7]; реке Мердеркилл, впадающей в залив Делавэр [8] и в реке Сунгари на северо-востоке Китая [9].

Преимуществом программы *WASP* являются возможность моделировать изменение показателей качества воды (таких как растворённый кислород (РК), биологическое потребление кислорода (БПК) и другие) и перемещение токсичных загрязнителей (органические вещества, химические вещества и металлы) [10]. Модель анализа качества воды позволяет интерпретировать процесс естественного и техногенного загрязнения воды [11]. В качестве недостатков авторы [12, 13] отмечают что некоторые

параметры программы такие как БПК и общий азот необходимо изменять и настраивать вручную, что в свою очередь может привести к замедлению процесса работы и снижению производительности, так как требуется дополнительное время и усилия для правильной настройки параметров модели.

Программный пакет *GPS-X* [14] предназначен для проведения математического моделирования процессов, связанных с технологиями очистки сточных вод. С помощью этого продукта можно создавать математические модели динамических систем, такие как *ASM1*, *ASM2* и т.д.. Он обладает аппаратом, который позволяет описывать основные процессы при очистке воды, например, процесс удаления из воды азота и фосфора. Результаты расчётов математической модели опираются на показатели, характеризующие общее содержание в воде органических веществ относительно количества, потраченного на окисление химически связанного кислорода, поскольку это наиболее точно отражает содержание органических загрязнителей в сточных водах. Этот подход отличается от использования показателя БПК, который характеризуется высокой погрешностью измерений и менее точными результатами, как указано в источнике [15].

*PHREEQC* [16] – программное обеспечение для гидрогеохимического моделирования водных растворов. *PHREEQC* взаимодействует с программным пакетом *AquaChem* [17], отвечающим за создание наглядных графиков и диаграмм с данными о качестве воды. При образовании связи пользователь может использовать образцы из базы данных *AquaChem*, считывать их во входной файл данных *PHREEQC* и генерировать общие симуляции. Перечисленные операции позволяют: управлять термодинамической базой данных и сопоставлять элементы из блока *SOLUTION_MASTER_SPECIES* базы данных с необходимыми параметрами; при создании симуляции добавлять дополнительные параметры и интегрировать информацию из одной программы в другую; позволяет сохранять и обмениваться набором параметров качества воды [18, 19].

Недостатками данного программного продукта являются: неполный набор параметров, необходимых для определённых задач, в особенности для сложных моделей; трудности в освоение программы пользователями из-за неудобного интерфейса; многие параметры необходимо настраивать вручную также, как и в программном пакете *WASP*.

*AQUASIM* – это программное обеспечение, используемое для моделирования и идентификации водных систем, особенно биоплёночных реакторов. Программа [20] предоставляет возможности для анализа процессов удаления загрязнителей в водных системах с использованием биоплёнок.

В работе [21] авторы на базе программы *AQUASIM* разрабатывают механистическую модель взвешенных твёрдых веществ на водно-болотных угодьях со свободной поверхностью воды. Разработанную модель успешно внедрили и в течение нескольких лет проводили проверки, используя её на двух полномасштабных водно-болотных угодьях. По итогам эксперимента выявили что ресуспендирование (процесс перемещения твёрдых частиц из оседающего состояния в жидкости обратно в суспензию или взвешенное состояние под воздействием каких-либо физических или химических процессов) вызванное ветром и деятельностью орнитофауны, является решающим процессом при изучении данных переменных. Возникающий растительный покров является ключевым фактором в улучшении осаждения твёрдых частиц и предотвращении повторного образования взвеси.

Авторы работы [22] в своём исследовании разрабатывают системы фильтрации и очистки загрязнённого пруда и используют программное обеспечение *AQUASIM* для оценки качества воды до и после очистки с использованием хлора.

Программы *WaterGEMS / EPANET* [23] предназначены для анализа и оптимизации работы водопроводных и канализационных сетей, прогнозирования потока воды, давления и качества воды, а также для разработки стратегий управления водоснабжением и обработки сточных вод. Согласно исследованиям [24], проведённым авторами для выполнения гидравлических испытаний, в данных программах использовались следующие параметры, такие как сведения о насосах, диаметр линий трубопровода, длина и детали надземного резервуара для обеспечения функционирования системы. В результате проведения компьютерного эксперимента определяли давление, расход, скорость жидкости и т.д. По результатам работы исследователей было проведено сравнение программных продуктов, согласно которому было выявлено незначительное расхождение расчётов, удобство интерфейса в программе *WaterGEMS*, а также наличие возможности для этой программы точно указать длину трубопровода, что позволяет проектировать различные конфигурации гидравлических систем, оснащённых клапанами и насосами.

Программный пакет *MODFLOW* [25], разработанный Геологической службой США, представляет собой мощный инструмент для моделирования подземных вод. Эта трёхмерная конечно-разностная модель уже более 30 лет служит международным стандартом для прогнозирования условий движения подземных вод и их взаимодействия с поверхностными водами. Программа отличается простотой использования и гибкостью в интеграции с другими программами, делая её популярной для гидрогеологических исследований и инженерных проектов. Код программы, написан на *FORTRAN* и позволяет взаимодействовать с различными форматами данных, обеспечивая как текстовый, так и двоичный вывод информации. *MODFLOW* предоставляет исследователям и инженерам возможность моделировать разнообразные

про-цессы, включая поток подземных вод, перемещение веществ и взаимодействие с поверхностными водами, что делает его неотъемлемым инструментом в изучении и управлении подземными водными ресурсами.

Анализ работы изученных программных продуктов представлен в таблице 1.

Таким образом, согласно представленным в таблице 1 позициям, можно увидеть в недостаточной мере сформированный функционал современных программ для решения задачи подбора очистителей балластных вод к заданным загрязнителям. В связи с чем актуальным становится создание программного продукта, предусматривающего:

– моделирование водных растворов при образовании связей между молекулами на квантово-химическом уровне,

– проведение подбора очистителей при определенной ситуации загрязнения,

– рассмотрение различного рода загрязнителей,

– создание и использование базы данных для уже найденных ранее значений.

*Таблица 1 – Анализ работы изученных программных продуктов*

| № | Название ПО | Моделирование водных растворов | Анализ воды | Показатели качества воды | Образование связи между молекулами | Использование баз данных | Использование квантово-химического аппарата | Подбор противоядий | Работа со списком загрязнителей |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | WASP | + | + | + | - | - | - | - | - |
| 2 | GPS-X | + | + | + | - | - | - | - | - |
| 3 | PHREEQC | + | + | + | + | + | - | - | - |
| 4 | AQUASIM | + | + | + | - | - | - | - | - |
| 5 | WaterGEMS / EPANET | + | + | + | - | - | - | - | - |
| 6 | MODFLOW | + | - | - | - | - | - | - | - |

**Результаты.** *Этапы создания программного комплекса.* Построение моделей очистки балластных вод от загрязнителей требует, как разработки собственного, так и использование существующего программного обеспечения. Такой подход позволит, опираясь на унифицированное описание молекул загрязнителей и очистителей, которые имеют различную природу, проводить изучение процесса их взаимодействия с помощью различных программных комплексов для квантово-химического моделирования и определять оптимальную геометрическую конфигурацию и энергетические параметры молекулярных структур. В результате чего становится возможным выявить активные центры межмолекулярных взаимодействий в структуре молекул по отношению друг к другу. Можно структурировать полученную информацию, хранить её и использовать для дальнейших исследований. Поэтому для разрабатываемого программного комплекса предлагается создание и использование базы данных «Очистители к загрязнителям». В качестве результатов эксперимента будет составляться так называемый «чек-лист» с рекомендациями пользователю по очистке балластных вод, содержащий ранжированный по эффективности список компонентов очистителей, соответствующий заданным загрязнителям. Работа предлагаемого программного комплекса описана с помощью схемы, изображённой на рисунке 1, и состоит из следующих этапов:

*Первый этап.* Входными параметрами программного комплекса служит список загрязнителей, для которых нужно подобрать очистители.

*Второй этап.* Список загрязнителей отправляется как запрос в базу данных «Очистители к загрязнителям».

*Третий этап.* Если информация в базе данных есть, то программный комплекс выдаёт информацию об уже найденных очистителях, соответствующих данным загрязнителям, пользователю и программа останавливает работу. Если информация в базе данных отсутствует, то происходит моделирование химических соединений и формирование их *z*-матриц. Для проведения квантово-химических расчётов молекулярных взаимодействий между молекулами взаимодействующих веществ, с использованием структурных формул. Пример структурных формул молекул взаимодействующих веществ приведён на рисунке 2. Проводится построение *z*-матриц загрязнителей и «дополнительных» очистителей (*z*-матрицы стандартных очистителей уже имеются в базе данных) и аутентификация с помощью квантово-химических программ и базы данных.

*Четвёртый этап.* Для построенных *z*-матриц проводится оптимизация их геометрической структуры с использованием квантово-химических расчётов при помощи программы *Gamess* [26].

В большинстве случаев поверхность потенциальной энергии молекулы характеризуется наличием нескольких минимумов, каждый из которых соответствует различным молекулярным состояниям. Локальные минимумы функции соответствуют энергетически устойчивым изомерам, а глобальный минимум соответствует термодинамически устойчивой форме. Иные геометрически устойчивые конфигурации молекулярной системы определяют остальные точки на графике поверхности потенциальной энергии. Если внешних воздействий на молекулярную систему нет, то она самопроизвольно смещается из неустойчивого состояния к ближайшему минимуму потенциальной энергии. В

реализованных компьютерных программах для квантово-химических расчётов применяется алгоритм поиска устойчивой геометрии молекулы в основном состоянии.

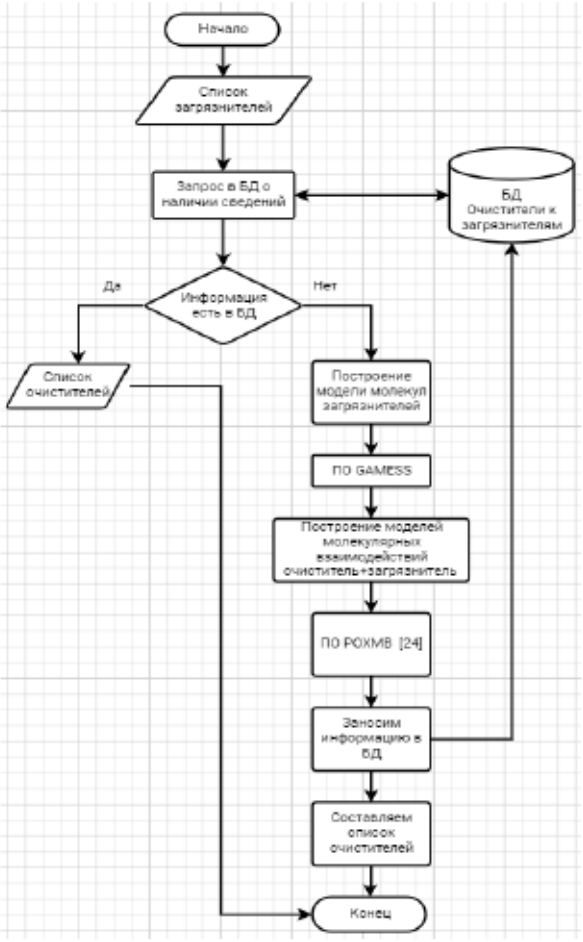



*Рисунок 1 – Структура и схема работы программного комплекса для целенаправленного поиска очистителей к заданным загрязнителям*

При исследовании химических соединений часто отсутствует информация о их точной структуре, поэтому начальная конфигурация соответствует неустойчивой форме молекулы. Для поиска минимума функции используется решение волнового урав-нения с начальными координатами ядер, вычисление полной энергии и определение градиентов энергии по всем независимым координатам молекулы. Градиенты указывают направление изменения координат, в соответствии с которым программа вычисляет новые значения. После этого решается уравнение Шрёдингера, находится энергия, градиенты и так далее. Процесс оптимизации завершается, когда норма градиента достигает заданное значение.

*Пятый этап.* Далее происходит построение моделей молекулярных взаимодействий между молекулами загрязнителей и очистителей. На этом этапе программа составляет *z*-матрицы молекулярных комплексов, перебирая все потенциальные активные атомы взаимодействия между молекулами. Количество таких *z*-матриц зависит от количества атомов во взаимодействующих молекулах и может занимать большие объёмы на жёстком диске компьютера. Поэтому информация о *z*-матрицах комплексов, которые используются в расчётах, носит временный характер, и по завершении расчётов ненужные файлы удаляются.

*Шестой этап.* Для построенных моделей взаимодействия проводится оптимизация их структуры с использованием квантово-химических расчётов при помощи программы *Gamess*. Каждый комплекс проверяется относительно образования водородной связи между потенциальными активными атомами в программе *POXMB* [27]. Если связь образовалась, то сработает счётчик и отмечается, что эффективность применения данного очистителя увеличивается.

*Седьмой этап.* В результате работы программного комплекса составляется ранжированный по эффективности список химических веществ, подходящих в качестве очистителя к данному загрязнителю.

Таким образом, при построении программного комплекса необходимо включение дополнительных модулей для обращения к внешним специализированным программам и созданной базе данных. Список с рекомендациями на выходе программы будет содержать информацию о загрязнителях, соответствующих им очистителях и характеризующих значениях их эффективности [27].

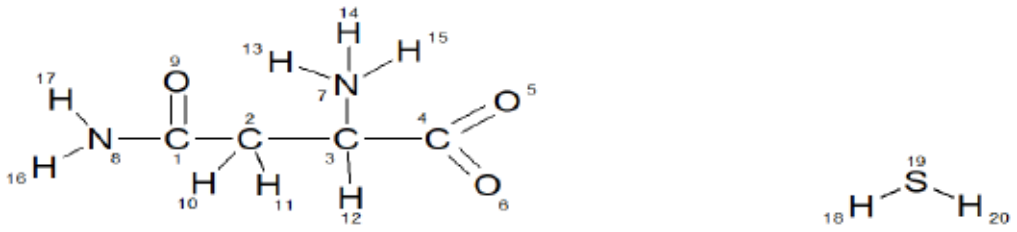


*Рисунок 2 – Примеры структурных формул молекул взаимодействующих веществ*

**Обсуждение.** В результате проведенных исследований удалось построить схему и описать алгоритм для создания программного обеспечения, реализующего недостающие (отмеченные прочерком) позиции таблицы 1 при решении задач, связанных с подбором очистителей балластных вод к заданным

загрязнителям.

**Выводы.** Программный комплекс может стать основой при разработке новых высокотехнологичных продуктов для фильтрации воды.

Информация из БД позволит оптимизировать процессы проверки качества фильтров, повысить безопасность и эффективность работы. Производители могут использовать БД для оптимизации работы с подбором компонентов фильтров и прогнозирования новой структуры фильтров.

Программный комплекс может быть использован для образовательных целей, включая обучение и повышение квалификации в области экологической безопасности, а также аналитической химии.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Анализ данных о загрязняющих веществах балластных вод / А.Н. Цыгута, Л.И. Головацкая // Транспорт. Горизонты развития: Труды 3-го Международного научно-промышленного форума, Нижний Новгород, 14-16 июня 2023 года. – Нижний Новгород: Волжский государственный университет водного транспорта, 2023. – С. 57. – EDN ETKUCZ.

2. Головацкая, Л.И. Оценка площади нефтяного загрязнения при разливах газового конденсата в Каспийском море / Л.И. Головацкая, А.Н. Бородин, А.Е. Пластинин // Морские интеллектуальные технологии. – 2023. – № 2-1(60). – С. 315-319. – DOI 10.37220/MIT.2023.60.2.039. – EDN MEQVPB.

3. Каленков, А.Н. Прогнозирование разливов нефти с судов в Амурском бассейне / А.Н. Каленков, А.Е. Пластинин // Научные проблемы водного транспорта. – 2023. – № 74. – С. 216-228. – DOI 10.37890/jwt.vi74.341. – EDN YLZIGA.

4. Pautova, O. Predictive Assessment of the Technical and Economic Effect of the Implementation of Automated Production Risk Management Systems at the Shipyard / O. Pautova, E. Burmistrov // International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia - 2021. Volume 2, Новосибирск, 11-14 мая 2021 года. – Новосибирск: Springer Nature, 2022. – P. 879-887. – DOI 10.1007/978-3-030-96383-5_97. – EDN CNRNKZ.

5. Water Quality Analysis Simulation Program (WASP) [Электронный ресурс] URL: https://www.researchgate.net/publication/26991027_Water_Quality_Analysis_Simulation_Program_WASP (дата обращения 10.03.2024).

6. Tim A. Wool, Steven R. Davie, Yuri M. Plis, John Hamrick The development of a hydrodynamic and water quality model to support TMDL determinations and water quality management of a stratified shallow estuary: Mobile Bay, Alabama // Proceedings of the Water Environment Federation, vol. 15, no. 4, pp. 378–392, 2003.

7. James W. Rules for responsible modeling. – Guelph, Ontario: CHI, 2003.

8. Vellidis G. et al. Mathematical simulation tools for developing dissolved oxygen TMDLs // Transactions of the ASABE. – 2006. – Т. 49. – №. 4. – С. 1003-1022.

9. Yu S., He L., Lu H. An environmental fairness based optimisation model for the decision-support of joint control over the water quantity and quality of a river basin //Journal of Hydrology. – 2016. – Т. 535. – С. 366-376.

10. Wool T.A. et al. Water quality analysis simulation program (WASP) // User's manual, Version. – 2006. – Т. 6.

11. Quijano J.C. et al. Three-dimensional model to capture the fate and transport of combined sewer overflow discharges: A case study in the Chicago Area Waterway System // Science of the Total Environment. – 2017. – Т. 576. – С. 362-373.

12. Kim T., Sheng Y.P. Estimation of water quality model parameters // KSCE Journal of Civil Engineering. – 2010. – Т. 14. – С. 421-437.

13. Wang X. et al. A fusion water quality soft-sensing method based on WASP model and its application in water eutrophication evaluation //Journal of Chemistry. – 2018. – Т. 2018.

14. GPS-X [Электронный ресурс] URL: https://www.hydromantis.com/GPSX-innovative.html (дата обращения 10.03.2024).

15. Баженов В.И., Устюжанин А.В. Очистные сооружения канализации: метод математического моделирования // Экология производства. – 2018. – №. 4. – С. 74.

16. PHREEQC [Электронный ресурс] URL: https://www.usgs.gov/software/phreeqc-version-3 (дата обращения 10.03.2024).

17. PHREEQC Model Configuration [Электронный ресурс] URL: https://help.syscad.net/PHREEQC_Model_Configuration (дата обращения 10.03.2024).

18. De Lucia M., Kühn M. Geochemical and reactive transport modelling in R with the RedModRphree package //Advances in Geosciences. – 2021. – Т. 56. – С. 33-43.

19. Alsemgeest J., Auqué L.F., Gimeno M.J. Verification and comparison of two thermodynamic databases through conversion to PHREEQC and multicomponent geothermometrical calculations //Geothermics. – 2021. – Т. 91. – С. 102036.

20. AQUASIM [Электронный ресурс] URL: https://www.eawag.ch/en/department/siam/software/ (дата обращения 10.03.2024).

21. Gargallo S. et al. Sedimentation and resuspension modelling in free water surface constructed wetlands //Ecological engineering. – 2017. – Т. 98. – С. 318-329.

22. Onyutha C., Kwio-Tamale J.C. Modelling chlorine residuals in drinking water: a review // International journal of Environmental Science and Technology. – 2022. – Т. 19. – №. 11. – С. 11613-11630.

23. EPANET [Электронный ресурс] URL: https://www.epa.gov/water-research/epanet (дата обращения 10.03.2024).

24. Mukherjee B., Das P., Das S. Comparison Model Study Using WaterGEMS and EPANET Software Programs for Clearwater Rising Main at Bhangar in West Bengal //Advanced Modelling and Innovations in Water Resources Engineering: Select Proceedings of AMIWRE 2021. – Springer Singapore, 2022. – С. 315-328.

25. MODFLOW 6: USGS Modular Hydrologic Model [Электронный ресурс] URL: https://www.usgs.gov/software/modflow-6-usgs-modular-hydrologic-model (дата обращения 10.03.2024).

26. Schmidt M. W. The General Atomic and Molecular Electronic Structure System / M.W. Schmidt, K.K. Baldridge, J. A. Boatz, S.T. Elbert et al. // J. Comput. Chem. – 1993. – Vol. 14. – P. 1347-1363. – EDN: SMPXPL

27. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011611798 Российская Федерация. Автоматизация расчётов основных энергетических и зарядовых характеристик при моделировании межмолекулярных взаимодействий: опубл. 28.02.2011 / Л.И. Жарких и др.

*Статья поступила в редакцию 28.10.2024*
*Статья принята к публикации 13.12.2024*