

18+

vek21.penzgtu.ru

ISSN 2221-951X

# XXI век : ИТОГИ ПРОШЛОГО И ПРОБЛЕМЫ НАСТОЯЩЕГО

*ПЛЮС*



# 2022

№3(59) Т.11



технические науки



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

Учредитель – ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет»

## **Главный редактор**

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

## **Заместители главного редактора:**

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

## **Редакционная коллегия:**

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

## **Ответственный секретарь**

Коростелева Анна Владимировна, кандидат технических наук

Основан в 2011 г.

18+

Том 11  
№ 3 (59)  
2022

Журнал выходит  
4 раза в год

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

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

Компьютерная верстка:  
В.В. Зупарова

Технический редактор:  
В.В. Зупарова

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

Подписано в печать 19.09.2022.

Выход в свет 26.09.2022.

Формат 60X84 1/8

Печать ризография.

Усл. печ. л. 23,2.

Тираж 100 экз. Заказ № 186.

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

## СВЕДЕНИЯ О ЧЛЕНАХ РЕДКОЛЛЕГИИ

### **Главный редактор**

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

### **Заместители главного редактора:**

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

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

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

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

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

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

Пашенко Дмитрий Владимирович, доктор технических наук, профессор, ректор

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

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

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

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

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

### **Редакционная коллегия:**

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

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

Андреев Юрий Александрович, доктор технических наук,

профессор кафедры «Пожарная безопасность» (Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия)

Антипов Сергей Тихонович, доктор технических наук, профессор,

заведующий кафедрой «Машины и аппараты пищевых производств»

(Воронежский государственный университет инженерных технологий, г. Воронеж, Россия)

Базарнова Юлия Генриховна, доктор технических наук, профессор,

директор Высшей школы биотехнологии и пищевых технологий

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

Бакин Игорь Алексеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Биотехнологий и производства

продуктов питания» (Кузбасская государственная сельскохозяйственная академия, г. Кемерово, Россия)

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

автоматика промышленных предприятий (Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г.

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

Богданов Андрей Владимирович, доктор технических наук, 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 автоматки и информационных

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

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

общественного питания», начальник отдела подготовки научных кадров

(Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Россия)

Дмитриев Михаил Сергеевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры автомобильного транспорта,

информационных технологий и методики обучения техническим дисциплинам

(Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет)

Зинкин Сергей Александрович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Вычислительная техника»

(Пензенский государственный университет, г. Пенза, Россия)

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

Иващенко Антон Владимирович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Вычислительная техника» (*Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия*)

Квятковская Ирина Юрьевна, доктор технических наук, профессор, проректор по учебной работе, заведующий кафедрой «Высшая и прикладная математика» (*Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань, Россия*)

Косников Юрий Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Информационно-вычислительные системы» (*Пензенский государственный университет, г. Пенза, Россия*)

Кручинина Наталия Евгеньевна, доктор технических наук, профессор, декан факультета биотехнологии и промышленной экологии, заведующий кафедрой «Промышленная экология» (*Российский государственный химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, г. Москва, Россия*)

Куликовских Илона Марковна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры информационных систем и технологий (*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, г. Самара, Россия*)

Мамедова Тарана Аслан кызы, доктор технических наук, профессор, заместитель директора (*Институт Нефтехимических процессов НАН Азербайджана, г. Баку, Азербайджан*)

Маскевич Сергей Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, директор (*Международный государственный экологический институт им.А.Д. Сахарова Белорусского государственного университета, г.Минск, Республика Беларусь*)

Махмудова Любовь Ширваниевна, доктор технических наук, профессор, директор (*Институт нефти и газа, Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова, г.Грозный, Чеченская Республика*)

Милентьева Ирина Сергеевна, доктор технических наук, доцент, доцент кафедры бионанотехнологии (*Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Россия*)

Михеев Михаил Юрьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные технологии и системы» (*Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Россия*)

Петрова Ирина Юрьевна, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры систем автоматизированного проектирования и моделирования (*Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, г. Астрахань, Россия*)

Прохоров Сергей Антонович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные системы и технологии» (*Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королева, г. Самара, Россия*)

Рожнов Евгений Дмитриевич, доктор технических наук, доцент кафедры биотехнологии (*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Бийский технологический институт (филиал), г. Бийск, Россия*)

Рыбаков Анатолий Валерьевич, доктор технических наук, профессор, начальник научно-исследовательского центра Академия гражданской защиты (*Академия гражданской защиты МЧС России, г. Москва, Россия*)

Стороженко Павел Аркадьевич, член-корреспондент Российской академии наук, доктор химических наук, профессор, управляющий директор ГНЦ РФ «Государственный ордена Трудового Красного Знамени НИИ химии и технологии элементоорганических соединений», профессор кафедры химии и технологии элементоорганических соединений (*Московский институт тонкой химической технологии имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия*)

Танклевский Леонид Тимофеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Пожарная безопасность» (*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Высшая школа техносферной безопасности, г. Санкт-Петербург, Россия*)

Таранцева Клара Рустемовна, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Биотехнологии и техносферная безопасность» (*Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Россия*)

Тихомирова Елена Ивановна, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой «Экология и техносферная безопасность» (*Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина, г. Саратов, Россия*)

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

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

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

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

## СОДЕРЖАНИЕ

**ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

<b>АНАЛИЗ И ВЫБОР СРЕДСТВ МОУШН-ДИЗАЙНА ПО ИНТЕГРАЛЬНОМУ КРИТЕРИЮ</b> Косников Юрий Николаевич, Утушкина Екатерина Владимировна.....	10
<b>ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ВЫЯВЛЕНИЯ ПРЕДВЕСТНИКОВ ОТКАЗОВ В МИКРОЭЛЕКТРОННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ</b> Тихонов Мартин Робертович.....	15
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОЛЩИНЫ И СВОЙСТВ УГЛЕГРАФИТОВОГО ВОЛОКНИСТОГО МАТЕРИАЛА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОВОССТАНОВЛЕНИЯ ИОНОВ ЖЕЛЕЗА НА ПРОТОЧНОМ ТРЕХМЕРНОМ ЭЛЕКТРОДЕ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ</b> Кошев Александр Николаевич, Варенцов Валерий Константинович, Кузина Валентина Владимировна.....	19
<b>ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ КЛАССИФИКАЦИЕЙ ПОЖАРНЫХ ПО СТЕПЕНИ РИСКА ТРАВМИРОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ДЕРЕВА РЕШЕНИЙ</b> Куватов Валерий Ильич, Моторыгин Юрий Дмитриевич, Смирнов Алексей Сергеевич.....	26
<b>СИНТЕЗ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ РЕГИОНА</b> Бурлов Вячеслав Георгиевич, Полухович Максим Алексеевич.....	32
<b>СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ В ВИДЕОПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ</b> Никифоров Михаил Борисович, Тарасов Андрей Сергеевич.....	39
<b>ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА СИСТЕМЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ТРЕНАЖЕРНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ПОДГОТОВКИ ШАХТЕРОВ</b> Архипов Алексей Евгениевич, Назарова Александра Олеговна, Обухов Артем Дмитриевич.....	45
<b>ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОДЕЛИ НАГРУЗКИ ПО МАССИВАМ ИЗМЕРЕНИЙ ПАССИВНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА</b> Бацева Наталья Ленмировна, Панкратов Алексей Владимирович, Жуйков Александр Константинович.....	51
<b>СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЧИСЛЕННЫХ И АНАЛИТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ «РАСХОДОМЕРНАЯ ТРУБКА – ЖИДКОСТЬ» В КОРИОЛИСОВЫХ РАСХОДОМЕРАХ</b> Гудкова Екатерина Александровна, Таранцева Клара Рустемовна, Михеев Михаил Юрьевич.....	57
<b>ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ УПРАВЛЕНИЯ В ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ ОБОРОННО-ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА</b> Бардулин Евгений Николаевич, Зиненко Артем Сергеевич.....	64
<b>МЕТОДИКА РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОАКТИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ ПРИ ЭЛЕКТРОВОССТАНОВЛЕНИИ ИОНОВ ЖЕЛЕЗА НА ПРОТОЧНОМ ТРЕХМЕРНОМ ЭЛЕКТРОДЕ</b> Кузина Валентина Владимировна, Варенцов Валерий Константинович, Кошев Александр Николаевич.....	69
<b>ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ НА ОСНОВЕ ПРЯМОГО ЦИФРОВОГО СИНТЕЗА</b> Чулков Валерий Александрович.....	74

---

<b>МОДИФИКАЦИЯ СТРАТЕГИИ РАЗВИТИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПЛАНИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ПОЛИТИКИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СУВЕРЕНИТЕТА</b>	
Ерженин Роман Валерьевич.....	81

**ТЕХНОЛОГИЯ ПРОДОВОЛЬСТВЕННЫХ ПРОДУКТОВ**

<b>ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ МАЛЫХ ДОЗ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ПРОРАЩИВАНИЯ ПШЕНИЦЫ</b>	
Тимакова Роза Темерьяновна, Ильюхина Юлия Владимировна, Ильюхин Руслан Васильевич.....	88

<b>ИЗУЧЕНИЕ ПРОБИОТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНСОРЦИУМА ШТАММОВ АЦИДОФИЛЬНОЙ ПАЛОЧКИ</b>	
Фролова Анна Сергеевна, Серазетдинова Юлия Ренатовна, Милентьева Ирина Сергеевна, Неверова Ольга Александровна.....	97

<b>ОЦЕНКА СВОЙСТВ НАПИТКОВ В МОДЕЛЬНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ</b>	
Нилова Людмила Павловна, Виноградова Анна Вячеславовна, Малютенкова Светлана Михайловна.....	103

<b>ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛИДЕКСТРОЗЫ В ПИТАНИИ ДЕТЕЙ РАННЕГО ВОЗРАСТА</b>	
Фомичева Дарья Андреевна, Мельчаков Роман Максимович, Лепешкин Артем Ильич.....	109

<b>ХАРАКТЕРИСТИКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АНТИМИКРОБНОЙ АКТИВНОСТИ ПЕПТИДНОЙ ФРАКЦИИ ТРИПСИНОВОГО ГИДРОЛИЗАТА МОЛОЗИВА КОРОВ</b>	
Тихонов Сергей Леонидович, Данилова Ирина Георгиевна, Тихонова Наталья Валерьевна, Тихонова Мария Сергеевна, Поповских Анжелика Денисовна.....	116

<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ ЭКСТРАКЦИОННОГО АППАРАТА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЛИНИИ ПО ПРОИЗВОДСТВУ ВИСКИ</b>	
Бородулин Дмитрий Михайлович, Сафонова Елена Александровна, Просин Максим Валерьевич, Головачева Яна Сергеевна.....	122

<b>ИЗУЧЕНИЕ СПОСОБНОСТИ МОЛОЧНОКИСЛЫХ БАКТЕРИЙ К ФЕРМЕНТАЦИИ РАСТИТЕЛЬНЫХ АНАЛОГОВ МОЛОКА</b>	
Серазетдинова Юлия Ренатовна, Фролова Анна Сергеевна, Милентьева Ирина Сергеевна, Минина Варвара Ивановна.....	128

<b>ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОРОШКА ТОПИНАМБУРА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПШЕНИЧНОГО ХЛЕБА</b>	
Варламова Елена Николаевна, Слугинова Наталья Ивановна, Зуева Елена Александровна, Панфилова Ирина Сергеевна.....	135

**ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**

<b>ОСНАЩЕНИЕ СТАПЕЛЬНЫХ МЕСТ СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ ЭЛЛИНГОВ СИСТЕМАМИ ПОЖАРОТУШЕНИЯ. ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ РЕШЕНИЯ</b>	
Лыткин Александр Сергеевич, Войтенко Олег Викторович, Евгенов Вадим Николаевич.....	141

<b>КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ МЕХАНИЗМ УПРАВЛЕНИЯ СВОЙСТВАМИ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ СИСТЕМ ПРИ НАНОМОДИФИЦИРОВАНИИ ОГНЕТУШАЩИХ И ОГНЕЗАЩИТНЫХ СОСТАВОВ</b>	
Иванов Алексей Владимирович.....	147

---

<b>СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ РИСКОВ</b> Кузнецова Дарья Александровна.....	154
<b>КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ПОДБОРУ СПЕЦИАЛЬНОЙ ОДЕЖДЫ БУРИЛЬЩИКА НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН С УЧЕТОМ ПОКАЗАТЕЛЯ РМУ</b> Каверзнева Татьяна Тимофеевна, Иванова Анна Андреевна, Чувашова Ксения Дмитриевна, Скрипник Игорь Леонидович.....	159
<b>ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРИ РАСЧЕТАХ ПО ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ</b> Романенко Александр Иванович, Тараканова Валентина Викторовна, Тертычная Светлана Вячеславовна.....	165
<b>ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА И ОЦЕНКИ ПОЖАРНОГО РИСКА ЗДАНИЯ</b> Авдеева Марина Олеговна, Узун Олег Леонидович, Доронин Александр Сергеевич, Заглядимов Константин Игоревич.....	170
<b>ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ЗДОРОВЬЕ РАБОТНИКОВ ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ ТРУДОВОГО ПРОЦЕССА</b> Антонова Анна Петровна, Кашевская Анна Михайловна, Нарусова Елена Юрьевна, Стручалин Владимир Гайозович.....	176
<b>МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ ИСТОЧНИКОВ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ПО СОДЕРЖАНИЮ ПРИМЕСЕЙ МЕТАЛЛОВ В НЕФТИ</b> Семенов Владимир Всеволодович, Ивахнюк Сергей Григорьевич, Моторыгин Юрий Дмитриевич.....	182
<b>СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ И ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ «СЕРОЙ» ВОДЫ В ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНАХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА</b> Арсентьева Елена Александровна, Коновал Инна Алексеевна.....	188
<b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАЧИМОСТИ КЛЮЧЕВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОЦЕССА ПРИГОТОВЛЕНИЯ БУРОВЫХ РАСТВОРОВ</b> Исмагилов Миннахмат Иригович, Барахнина Вера Борисовна, Юсупова Алия Булатовна.....	193
<b>ВЕРОЯТНОСТНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭНЕРГИИ ЭМП НА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ ПЕРСОНАЛ</b> Закирова Альфия Резавановна.....	199
<b>К ЗАДАЧЕ ФОРМИРОВАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО ИНДЕКСА БЕЗОПАСНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ</b> Воскобоев Виктор Федорович, Рыбаков Анатолий Валерьевич, Иванов Евгений Вячеславович, Сорокин Алексей Юрьевич.....	204
<b>АНАЛИЗ КУЛЬТУРЫ БЕЗОПАСНОСТИ С ЦЕЛЬЮ МИНИМИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ТРАВМАТИЗМА</b> Гончарук Татьяна Николаевна.....	210

## CONTENT

*INFORMATION SCIENCE, COMPUTING DEVICES AND CONTROLLING***ANALYSIS AND SELECTION OF MOTION DESIGN TOOLS ACCORDING TO THE INTEGRAL CRITERION**

Kosnikov Yuriy Nikolaevich, Utushkina Ekaterina Vladimirovna.....10

**PRINCIPLES OF ORGANIZING THE EXPERT SYSTEM FOR DETECTING PRECURSORS OF FAILURES IN MICROELECTRONIC PRODUCTION**

Tikhonov Martin Robertovich.....15

**RESEARCH OF IMPACTS OF THE THICKNESS AND FEATURES OF CARBON-GRAPHITE FIBROUS MATERIAL ON THE EFFICIENCY OF ELECTRICAL RECOVERY OF IRON IONS ON A FLOWING THREE-DIMENSIONAL ELECTRODE BY MATHEMATICAL SIMULATION METHODS**

Koshev Alexander Nikolaevich, Varentsov Valery Konstantinovich, Kuzina Valentina Vladimirovna.....19

**PRINCIPLES OF MANAGING THE CLASSIFICATION OF FIREMANS BY RISK OF INJURY WITH THE HELP OF A DECISION TREE**

Kuvatov Valery Ilyich, Motorygin Yury Dmitrievich, Smirnov Alexey Sergeevich.....26

**SYNTHESIS OF THE ELECTRIC POWER SUPPLY SAFETY ENSURING SYSTEM OF A REGION**

Burlov Vyacheslav Georgievich, Polyukhovich Maxim Alekseevich.....32

**SYSTEM FOR AUTOMATIC DETECTION OF MOVING OBJECTS IN A VIDEO SEQUENCE**

Nikiforov Mikhail Borisovich, Tarasov Andrey Sergeevich.....39

**FORMULATION OF THE PROBLEM OF STRUCTURAL-PARAMETRIC SYNTHESIS OF THE VISUALIZATION SYSTEM OF THE SIMULATION COMPLEX FOR TRAINING MINERS**

Arkhipov Alexey Evgenievich, Nazarova Alexandra Olegovna, Obukhov Artem Dmitrievich.....45

**SOFTWARE FOR THE IDENTIFICATION OF A LOAD MODEL BY ARRAYS, MEASURED BY PASSIVE EXPERIMENT**

Batseva Natalia Lenmirovna, Pankratov Aleksey Vladimirovich, Zhuykov Aleksandr Konstantinovich.....51

**COMPARATIVE ANALYSIS OF NUMERICAL AND ANALYTICAL METHODS FOR MODELING THE «FLOW TUBE – LIQUID» SYSTEM IN CORIOLIS FLOWMETERS**

Gudkova Ekaterina Aleksandrovna, Tarantseva Klara Rustemovna, Mikheev Mikhail Yurievich.....57

**THEORETICAL ASPECTS OF MANAGEMENT IN ORGANIZATIONAL SYSTEMS OF THE DEFENSE INDUSTRIAL COMPLEX**

Bardulin Evgeny Nikolaevich, Zinenko Artem Sergeevich.....64

**THE CALCULATION METHODOLOGY OF ELECTRICALLY ACTIVE COMPONENTS DISTRIBUTION DURING THE ELECTRICAL REDUCTION OF IRON IONS ON A FLOWING THREE-DIMENSIONAL ELECTRODE**

Kuzina Valentina Vladimirovna, Varentsov Valery Konstantinovich, Koshev Alexander Nikolaevich.....69

**FUNCTIONAL GENERATORS BASED ON DIRECT DIGITAL SYNTHESIS**

Chulkov Valery Alexandrovich.....74

<b>MODIFICATION OF THE PLANNING INFORMATION SYSTEM DEVELOPMENT STRATEGY UNDER THE CONDITIONS OF THE TECHNOLOGICAL SOVEREIGNTY POLICY</b> Erzhenin Roman Valerievich.....	81
---	----

### *FOOD TECHNOLOGY*

<b>STUDY OF THE EFFECT OF LOW RADIATION DOSES ON THE INTENSITY OF WHEAT GERMINATION</b> Timakova Rozatemer'janovna, Iliukhina Iuliia Vladimirovna, Iliukhin Ruslan Vasilievich.....	88
--	----

<b>STUDYING THE PROBIOTIC PROPERTIES OF A CONSORTIUM STANDS OF LACTOBACILLUS ACIDOPHILUS</b> Frolova Anna Sergeevna, Serazetdinova Yulia Renatovna, Milentyeva Irina Sergeevna, Neverova Olga Alexandrovna.....	97
---	----

<b>EVALUATION OF PROPERTIES OF BEVERAGES IN A MODEL EXPERIMENT</b> Nilova Liudmila Pavlovna, Vinogradova Anna Vyacheslavovna, Malutenkova Svetlana Michailovna.....	103
--	-----

<b>PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF POLYDEXTROSE IN THE NUTRITION OF INFANT CHILDREN</b> Fomicheva Daria Andreevna, Melchakov Roman Maksimovich, Lepeshkin Artem Ilyich.....	109
---	-----

<b>CHARACTERISTICS AND STUDY OF THE ANTIMICROBIAL ACTIVITY OF THE PEPTIDE FRACTION OF THE TRIPSIN HYDROLYZATE OF COW COLOSTRUM</b> Tikhonov Sergei Leonidovich, Danilova Irina Georgievna, Tikhonova Natalia Valerievna, Tikhonova Maria Sergeevna, Popovskih Anzhelika Denisovna.....	116
--	-----

<b>STUDY OF THE EFFICIENCY OF THE EXTRACTION APPARATUS OF NEW DESIGN IN THE TECHNOLOGICAL LINE FOR THE PRODUCTION OF WHISKEY</b> Borodulin Dmitry Mikhailovich, Safonova Elena Aleksandrovna, Prosin Maksim Valerievich, Golovacheva Yana Sergeevna.....	122
--	-----

<b>STUDY OF THE ABILITY OF LACTIC ACID BACTERIA TO FERMENT PLANT ANALOGUES OF MILK</b> Serazetdinova Yulia Renatovna, Frolova Anna Sergeevna, Milentyeva Irina Sergeevna, Minina Varvara Ivanovna.....	128
--	-----

<b>THE USE OF JERUSALEM ARTICHOKE POWDER IN THE PRODUCTION OF WHEAT BREAD</b> Varlamova Elena Nikolaevna, Sluginova Natalya Ivanovna, Zueva Elena Aleksandrovna, Panfilova Irina Sergeevna.....	135
---	-----

### *TECHNOSPHERE SAFETY*

<b>EQUIPPING OF SLIPWAYS OF SHIPBUILDING BOATHOUSES WITH FIRE EXTINGUISHING SYSTEMS. PROBLEMS AND SOLUTIONS</b> Lytkin Alexander Sergeevich, Voitenok Oleg Viktorovich, Evgenov Vadim Nikolaevich.....	141
---	-----

<b>NANOMODIFICATION OF FIRE-EXTINGUISHING AND PROTECTIVE COMPOSITIONS: CONCEPTUAL SUBSTANTIATIONS MECHANISM OF PROPERTY CONTROL IN TWO-COMPONENT SYSTEMS</b> Ivanov Alexey Vladimirovich.....	147
--	-----

<b>COMPARATIVE ANALYSIS OF RISK ASSESSMENT METHODS</b> Kuznetsova Daria Alexandrovna.....	154
--	-----

<b>INTEGRATED APPROACH TO THE SELECTION OF SPECIAL CLOTHES OIL WELL DRILLER ACCORDING TO <i>PMV</i></b> Kaverzneva Tatyana Timofeevna, Ivanova Anna Andreevna, Chuvashova Ksenia Dmitrievna, Skripnik Igor Leonidovich.....	159
<b>SOFTWARE APPLICATION FOR FIRE SAFETY CALCULATIONS</b> Romanenko Alexander Ivanovich, Tarakanova Valentina Viktorovna, Tertychnaya Svetlana Vyacheslavovna.....	165
<b>APPLICATION OF THE SIMULATION MODELING METHOD OR CALCULATING AND ASSESSING THE FIRE RISK OF A BUILDING</b> Avdeeva Marina Olegovna, Uzun Oleg Leonidovich, Doronin Alexander Sergeevich, Zaglyadimov Konstantin Igorevich.....	170
<b>PROFESSIONAL HEALTH OF HIGHER SCHOOL EMPLOYEES IN MODERN CONDITIONS OF THE LABOR PROCESS</b> Antonova Anna Petrovna, Kashevskaya Anna Mikhailovna, Narusova Elena Yurievna, Struchalin Vladimir Gaiozovich.....	176
<b>PROCEDURE FOR IDENTIFICATION OF SOURCES OF OIL POLLUTION BY THE CONTENT OF METAL IMPURITIES IN OIL</b> Semenov Vladimir Vsevolodovich, Ivakhnyuk Sergey Grigorievich, Motorygin Yury Dmitrievich.....	182
<b>MODERN TECHNOLOGIES OF PURIFICATION AND DISINFECTION OF "GRAY" WATER IN PASSENGER CARS OF RAILWAY TRANSPORT</b> Arsentieva Elena Aleksandrovna, Konoval Inna Alekseevna.....	188
<b>DETERMINATION OF THE SIGNIFICANCE OF KEY SAFETY INDICATORS OF THE DRILLING FLUID PREPARATION PROCESS</b> Ismagilov Minnakhmat Irigovich, Barakhnina Vera Borisovna, Yusupova Aliya Bulatovna.....	193
<b>PROBABILISTIC METHOD FOR ASSESSING THE IMPACT OF EMF ENERGY FOR ELECTRICAL ENGINEERING PERSONNEL</b> Zakirova Alfiya Rezavanovna.....	199
<b>TO THE TASK OF FORMING AN INTEGRAL SAFETY INDEX OF THE FUNCTIONING OF A TECHNICAL SYSTEM</b> Voskoboev Viktor Fedorovich, Rybakov Anatolij Valer'evich, Ivanov Evgenij Vyacheslavovich, Sorokin Aleksey Yur'evich.....	204
<b>THE SAFETY CULTURE ANALYSIS TO MINIMIZE OCCUPATIONAL INJURIES</b> Goncharuk Tatiana Nikolaevna.....	210

УДК 004.4'275

DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0001

## АНАЛИЗ И ВЫБОР СРЕДСТВ МОУШН-ДИЗАЙНА ПО ИНТЕГРАЛЬНОМУ КРИТЕРИЮ

© Автор(ы) 2022

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, e-mail: kosnikov@gmail.com)

SPIN: 4856-0704

AuthorID: 1140560

ORCID: 0000-0003-1038-8902

**УТУШКИНА Екатерина Владимировна**, магистрант  
*Пензенский государственный университет*  
(440026, Россия, Пенза, улица Красная, 40, e-mail: katerina64.97@mail.ru)

**Аннотация.** Моушн-дизайн – технология анимации объектов графического дизайна: рисунков, инфографики, текста, пространственных и плоских объектов. Моушн-дизайн все шире применяется в обучении, бизнесе, индустрии развлечений, торговле и других областях деятельности. Информация о программных средствах моушн-дизайна разрознена по различным информационным источникам, ее состав и подробность в разных источниках различны. Перед пользователем встает задача выбора программных средств для изготовления продуктов моушн-дизайна. В статье описан и применен способ оценки программных средств в соответствии с индивидуальными требованиями пользователя. Способ основан на применении двух уровней оценки. На первом уровне оцениваются функциональные возможности программных средств, на втором уровне программные средства оцениваются по совокупности их свойств. Для комплексной оценки, кроме уровня функциональных возможностей, предложено использовать показатели: вид изображения, системные требования, стоимость лицензии, наличие пробной версии, язык интерфейса, наличие методических материалов. На обоих уровнях оценки используется аддитивный весовой критерий, в результате возникает «двойное взвешивание». Весовые коэффициенты назначаются пользователем, исходя из его индивидуальных предпочтений. Предложенный способ оценки может помочь выбрать программные средства различным категориям пользователей. Даны рекомендации по его использованию. Применение способа показано на примерах, в частности, описан выбор программных средств для начинающих пользователей.

**Ключевые слова:** моушн-дизайн, анимационная графика, программное обеспечение, индивидуальные требования, оценка, показатель оценивания, выбор, весовой критерий, «двойное взвешивание».

## ANALYSIS AND SELECTION OF MOTION DESIGN TOOLS ACCORDING TO THE INTEGRAL CRITERION

© The Author(s) 2022

**KOSNIKOV Yuriy Nikolaevich**, doctor of technical sciences, professor of «Information and Computing Systems»

**UTUSHKINA Ekaterina Vladimirovna**, master's student

*Penza State University*

(440026, Russia, Penza, Krasnaya Street, 40, e-mails: kosnikov@gmail.com, katerina64.97@mail.ru)

**Abstract.** Motion design is a animation technology of graphic design objects: drawings, infographics, text, spatial and flat objects. Motion design is increasingly being used in education, business, entertainment, trade and other fields of activity. Information about motion design software is scattered across various information sources, its composition and details are different in different sources. The user is faced with the task of choosing software tools for the manufacture of motion design products. The article describes and applies a method for evaluating software tools in accordance with individual user requirements. The method is based on the use of two levels of evaluation. At the first level, the functionality of software tools is evaluated, at the second level, software tools are evaluated according to the totality of their properties. For a comprehensive assessment, in addition to the level of functionality, it is proposed to use indicators: image type, system requirements, license cost, availability of a trial version, interface language, availability of methodological materials. At both levels of evaluation, an additive weight criterion is used, resulting in a "double weighting". The weight coefficients are assigned by the user based on his individual preferences. The proposed method of evaluation can help to choose software tools for different categories of users. Recommendations for its use are given. The application of the method is shown by examples, in particular, the choice of software tools for novice users is described.

**Keywords:** motion design, animation graphics, software, individual requirements, evaluation, evaluation indicator,

selection, weight criterion, "double weighing".

**Для цитирования:** Косников Ю.Н. Анализ и выбор средств моушн-дизайна по интегральному критерию / Ю.Н. Косников, Е.В. Утушкина // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022. – Т. 11. – № 3(59). – С. 10-14. – DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0001.

**Введение.** Моушн-дизайн (от английского «*motion*» – движение) – недавно появившееся направление дизайна, основанное на «оживлении» графики с помощью анимации [1-3]. Моушн-дизайн часто называют анимационной графикой, хотя у него и анимации есть различия. Объектом анимации, как правило, является сюжетное повествование, в то время как моушн-дизайн нацелен на создание динамики элементов дизайна: геометрических 2D- и 3D-объектов, реалистичных образов, текста, инфографики и т.д. Сегодня моушн-дизайн является одним из самых прогрессирующих и востребованных направлений дизайна, с его помощью легко одновременно и привлекать, и информировать зрителя. Обучение, бизнес, развлечения, торговля, кино, инфографика, веб-приложения различного назначения – вот неполный перечень сфер применения средств моушн-дизайна [4-7]. Его широкое распространение означает, что к этой технологии обращаются представители самых разных предметных областей. При этом перед ними встает задача выбора программных средств, предназначенных для создания продуктов моушн-дизайна.

В настоящее время существует довольно разветвленное программное обеспечение для изготовления продуктов моушн-дизайна [8-10]. Информация о нем часто имеет рекламный характер и не позволяет объективно оценить его характеристики. Кроме того, такая информация разрознена по различным источникам, ее структура и состав для тех или иных программ различны. В связи с этим встает задача систематизации программных средств (ПС) моушн-дизайна. Такую систематизацию можно выполнить лишь на основе объективных критериев, которые в этой области в настоящее время не устоялись. В статье производится попытка выдвигания критериев сравнения ПС моушн-дизайна, систематизации ПС по этим критериям и представления рекомендаций по выбору программного обеспечения.

**Методология.** Одним из определяющих свойств ПС является их функционал. Системный анализ предписывает применять для оценки однотипных объектов числовой критерий, однако сформировать его не всегда возможно. Например, брать в качестве оценочного показателя ПС моушн-дизайна количество поддерживаемых операций или эффектов непродуктивно, так как разные операции и эффекты несравнимы по их значимости для потребителя анимации. К тому же это количество, если брать его из опубликованных данных, зависит от детальности описания возможностей ПС его разработчиком, а исследование возможностей всех ПС на практике весьма затруднительно. Можно предложить перейти

от локальных операций создания и видоизменения фрагментов анимации к их внешним проявлениям, то есть к смысловым изобразительным возможностям, важным для восприятия анимации наблюдателем.

В качестве таких возможностей можно предложить:

– создание и редактирование объектов анимации. Это моделирование 2D и 3D пространственных геометрических форм, компоновка сложных объектов из отдельно построенных фрагментов, создание дублей объектов, интерактивное изменение геометрических характеристик объектов и фрагментов (деформация, изменение размеров);

– задание материала и текстуры поверхности объектов. Сюда входят закраска и наложение характерного узора на поверхность объекта, физически правильные материалы;

– моделирование реалистического освещения объектов. Как известно, к компонентам реалистического освещения относятся освещение рассеянным светом, диффузное освещение, освещение с зеркальным отражением и самосвечение;

– разработка композиции анимированной сцены. К ней относятся добавление и расстановка объектов, возможность изменения ракурса наблюдения сцены;

– задание и редактирование траекторий (треков) движения объектов, а также характеристик движения (скорости, плавности или рывков);

– создание дополнительных эффектов движения, например, учет физических закономерностей среды (трение, скольжение, сопротивление воздуха и воды);

– создание текстовой анимации. Эта анимация приводит слова в движение, а также позволяет создавать плавающие фразы или анимированный логотип.

К этим визуальным свойствам сцены следует добавлять облегчение работы дизайнера путем выбора заготовки сцены из шаблонов анимации.

Кроме показателей, влияющих на функционал ПС, важное значение для разработчика продуктов моушн-дизайна имеют и такие показатели, как:

– вид изображения (двумерное и/или трехмерное изображение);

– системные требования;

– стоимость лицензии;

– наличие пробной версии;

– язык интерфейса (предпочтительно – русский язык);

– наличие методических материалов.

Перечисленные показатели сложно представить в количественной форме, поэтому можно предложить следующий прием. Каждый показатель ложится в основу частного критерия оценивания ПС. Критерий заключается в наличии желаемого показателя у

рассматриваемого ПС. Каждое программное средство последовательно анализируется на соответствие частным критериям. В самом простом случае наличие соответствия отмечается как единица, отсутствие как ноль. В более сложных случаях могут быть введены и промежуточные значения. Тем самым формируется фактор соответствия (*compliance factor* – *CF*). Для перехода к количественной оценке ПС каждый частный критерий получает уровень значимости  $\alpha$  (вес). Веса назначаются пользователем, исходя из его индивидуальных требований к анимированной сцене. При этом, если частный критерий заключается в максимизации показателя (например, производительность системы), его вес принимает положительное значение, если же частный критерий заключается в минимизации показателя (например, стоимость системы), его вес берется со знаком «минус». Возможные правила назначения весов таковы:

- сумма абсолютных значений весов составляет единицу, и ее доли распределяются между показателями;

- самый малозначимый частный критерий получает единичное абсолютное значение, остальные частные критерии получают веса в виде целых чисел, кратных единице.

Теперь для оценки ПС может быть применен количественный интегральный критерий, в частности, аддитивный весовой критерий.

Каждое ПС характеризуется несколькими показателями, из которых показатель уровня функциональных возможностей является основным. Он определяется несколькими слагаемыми, в связи с чем предлагается проводить выбор ПС для изготовления продуктов моушн-дизайна на основе «двойного взвешивания».

Критерий, построенный на основе «двойного взвешивания», включает два уровня оценки – нижний и верхний. Нижний уровень предназначен для оценки одного показателя ПС, а именно, – функционала, который определяется несколькими слагаемыми, имеющими, с точки зрения пользователя, различную значимость. В качестве частного критерия для оценки функционала предлагается положить максимизацию фактора соответствия функционала. Оценить фактор соответствия можно с помощью весового аддитивного

критерия:

$$CF_1 = \sum_{j=1}^M \beta_{1-j} \cdot CF_{1-j} \quad (1)$$

Значимость задается пользователем в виде назначения весовых коэффициентов  $\beta_{1-j}$ , где 1 в нижнем индексе означает, что коэффициент относится к первому уровню критерия (к оценке функционала), а  $j$  – порядковый номер слагаемого функционала (всего их  $M$ ).  $CF_{1-j}$  – значение фактора соответствия для  $j$ -го слагаемого первого уровня критерия.

Верхний уровень критерия предназначен для комплексной оценки всего ПС в целом по аддитивному весовому критерию  $K$ :

$$K = \sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot CF_i \quad (2)$$

где  $CF_i$  – значение фактора соответствия для  $i$ -го свойства ПС, причем  $CF_i$  определяется формулой (1), а остальные значения определяются пользователем на основе его предпочтений;

$N$  – количество показателей оценки ПС (количество частных критериев);

$\alpha_i$  – уровень значимости (вес)  $i$ -го показателя.

Оптимальному по интегральному критерию программному средству соответствует максимальное значение критерия.

**Результаты.** Спектр программных средств для изготовления продуктов моушн-дизайна довольно широк. К наиболее популярным, по мнению пользователей, относятся такие программы: *Adobe After Effects*, *Blender*, *Explaindio*, *Cinema 4D*, *OpenToonz*, *Synfig Studio*, *Toon Boom Harmony* [11-17].

Их анализ по выдвинутым частным критериям дает результат, показанный в таблицах. Для каждого показателя назначен вес, показанный в отдельной графе. Для примера веса назначены по усмотрению авторов. Оценка функционала программных средств и рассчитанные значения фактора соответствия представлены в таблице 1.

Комплексная оценка программных средств по критериям: вид изображения (двумерное и/или трехмерное изображение), системные требования, стоимость лицензии, наличие пробной версии, язык интерфейса, наличие методических материалов и шаблонов анимации, а также рассчитанные значения критерия представлены в таблице 2. Значения критерия вычислены по формуле (2). В первой строке данных в таблице показаны значения фактора соответствия функционала ПС, взятые из таблицы 1.

Таблица 1 – Оценка функционала программных средств моушн-дизайна

Показатель	Вес	Факторы соответствия программных средств						
		Toon Boom Harmony	Explaindio	Cinema 4D	Synfig Studio	Adobe After Effects	OpenToonz	Blender
Создание и редактирование объектов анимации	0,1	1	0,5	1	1	0,5	1	1
Задание материала и текстуры поверхности объектов	0,05	1	0	1	0	1	0,5	1
Моделирование реалистического освещения объектов	0,05	0	0	1	0	1	0	1
Разработка композиции анимированной сцены	0,1	1	0,5	1	1	1	1	1
Задание и редактирование траекторий движения объектов	0,1	1	0	1	1	1	1	1
Создание дополнительных эффектов движения	0,025	0	0	1	0	1	1	1
Создание текстовой анимации	0,025	0	0,5	1	1	1	0	0
Наличие шаблонов анимации	0,05	0	1	0	0	1	0	0
Значение фактора соответствия $CF_1$		0,4	0,2	0,5	0,3	0,5	0,4	0,4

Таблица 2 – Комплексная оценка программных средств моушн-дизайна

Показатель	Вес	Факторы соответствия программных средств						
		Toon Boom Harmony	Explaindio	Cinema 4D	Synfig Studio	Adobe After Effects	OpenToonz	Blender
Функционал	0,5	0,4	0,2	0,5	0,3	0,5	0,4	0,4
Виды изображения	0,1	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Системные требования	-0,15	1	1	1	0,5	1	0,5	0,5
Стоимость лицензии	-0,1	0,5	1	1	0	1	0	0
Пробная версия	0,1	0,5	0,5	0,5	1	0,5	1	1
Язык интерфейса	0,025	1	1	0,5	1	0,5	1	0,5
Наличие методических материалов	0,025	0,5	1	0,5	0,5	1	1	1
Значение критерия K		0,2875	0,1125	0,325	0,4375	0,3375	0,475	0,5375

**Обсуждение.** Приведенные в таблицах 1, 2 данные позволяют назвать трех явных лидеров по назначенным критериям среди сравниваемых ПС: *OpenToonz*, *Blender* и *Synfig Studio*. Значения интегрального критерия *K* для них близки или превышают 0,5. Анализ показывает, что эти ПС получили преимущество, прежде всего, за счет широкого функционала, который имеет максимальный весовой коэффициент. Наряду с этим названные ПС имеют средние требования к потребным ресурсам вычислительной системы, что дает весьма незначительное уменьшению значений критерия *K*. Наконец, немаловажное значение имеет тот факт, что эти ПС являются свободно распространяемыми. Минимальное значение критерия получил программный продукт *Explaindio*. На его оценку повлияли, прежде всего, серьезные системные требования и платная лицензия. Приведенный пример показывает, что, используя «двойное взвешивание», пользователь может обоснованно выбрать ПС в соответствии с предпочтениями (весовыми коэффициентами), определенными им для решения своих прикладных задач.

Следует отметить, что описанный подход может помочь выбрать ПС различным категориям пользователей. Группы дизайнеров, различающиеся по целям, опыту, ресурсам, могут выдвигать к ПС моушн-

дизайна разные требования. Например, начинающие пользователи, которые хотят решить, стоит ли заниматься этой технологией, скорее всего, начнут с бесплатных, более простых программ, имеющих учебные материалы. «Продвинутый» функционал в этом случае не так важен. Профессиональные пользователи, отслеживающие появление новых ПС и желающие перейти на более совершенное программное обеспечение, напротив, будут обращать основное внимание на широту функциональных возможностей. И, возможно, и те, и другие предпочтут средства с более скромными ценой и потреблением ресурсов. Для оценки ПС в таких случаях можно рекомендовать применять описанную оценку с весовыми коэффициентами, переназначенными в соответствии с текущими предпочтениями. Другими словами, выполняется оценка ПС не на основе их свойств, а на основе «ситуации». Более того, для упрощения процесса оценки следует ограничить число показателей ПС, оставив наиболее важные для выбранной ситуации.

В качестве примера из таблицы 2 путем ее минимизации получена таблица 3, включающая показатели, важные для начинающих пользователей. Значения весовых коэффициентов выбраны по усмотрению авторов.

Таблица 3 – Комплексная оценка программных средств моушн-дизайна для начинающих пользователей

Показатель	Вес	Факторы соответствия программных средств						
		Toon Boom Harmony	Explaindio	Cinema 4D	Synfig Studio	Adobe After Effects	OpenToonz	Blender
Системные требования	-0,1	1	1	1	0,5	1	0,5	0,5
Стоимость лицензии	-0,5	0,5	1	1	0	1	0	0
Язык интерфейса	0,1	1	1	0,5	1	0,5	1	0,5
Наличие методических материалов	0,3	0,5	1	0,5	0,5	1	1	1
Значение критерия K		-0,1	-0,2	-0,4	0,2	-0,25	0,35	0,3

Результаты оценки показывают, что преобладающие требования к стоимости и учебным материалам обуславливают выбор программы *OpenToonz* в качестве оптимальной для начинающих.

**Выводы.** Предложен подход к оценке и выбору программного обеспечения моушн-дизайна на основе факторов соответствия свойств ПС индивидуальным требованиям пользователя. Подход позволяет применить формализованный весовой критерий качества ПС, несмотря на неформальное представление свойств программного обеспечения. Использовано «двойное взвешивание» показателей

ПС, позволяющее учесть особенности функционала ПС и их комплексную характеристику. Субъективное назначение весовых коэффициентов в данном случае не является недостатком способа оценки, а является его компонентом.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Stone R.B., Wahlin L. (editor). The Theory and Practice of Motion Design: Critical Perspectives and Professional Practice (1st Edition) // by R. Brian Stone (Editor), Leah Wahlin (Editor). – NY: Focal Press, 2018. – 352 p.
2. Biteabl. What is motion graphics? [Электронный ресурс]. – URL: <https://biteable.com/blog/what-is-motion-graphics/> (дата обращения: 04.04.2022).

3. Дулимова Е.С. Моушн-дизайн. Значение и тенденции развития [Электронный ресурс]: Научная электронная библиотека // Актуальные научные исследования в современном мире, 2017. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28786373> (дата обращения: 06.04.2022).
4. Shaw A. Design for motion: fundamentals and techniques of motion design (Second edition) / A. Shaw. – NY, Routledge: Taylor & Francis Group, 2020. – 400 p.
5. Korenman J. The Freelance Manifesto: A Field Guide for the Modern Motion Designer / J. Korenman. – Carson City: Lioncrest Publishing, 2017. – 358 p.
6. Braha Y. Creative Motion Graphic. Titling for Film, Video, and the Web / Y. Braha, B. Вуте. – NY: Focal Press, 2013. – 410 p.
7. Шаповалова С. Волшебство в движении: что такое моушн-дизайн / С Шаповалова // Нетология медиа. [Электронный ресурс]. – URL: <https://netology.ru/blog/motion-design> (дата обращения: 06.04.2022).
8. Fixthephoto. 9 Best Motion Graphics Software in 2022 [Электронный ресурс]. – URL: <https://fixthephoto.com/best-motion-graphics-software.html> (дата обращения: 06.04.2022).
9. Biswas M. 6 Essential Tools of Motion Graphics You Should Know in 2021 / M. Biswas // Webdew [Электронный ресурс]. – URL: <https://careers.webdew.com/blog/tools-of-motion-graphics> (дата обращения: 06.04.2022).
10. Korenman A. The Ultimate Guide to Motion Graphics Software 2020 / A. Korenman // Schoolofmotion [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.schoolofmotion.com/blog/best-animation-motion-graphics-software> (дата обращения: 08.04.2022).
11. Adobe. Adobe After Effects [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.adobe.com/ru/products/aftereffects.html> (дата обращения: 18.04.2022).
12. Blender [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.blender.org/> (дата обращения: 30.04.2022).
13. Explandio [Электронный ресурс]. – URL: <http://explain-dio.com/v4-fe/> (дата обращения: 14.04.2022).
14. MAXON. Cinema 4D [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.maxon.net/ru/cinema-4d> (дата обращения: 14.04.2022).
15. OpenToonz [Электронный ресурс]. – URL: <https://opentoonz.github.io/e/> (дата обращения: 18.04.2022).
16. Sunfig. Synfig Studio [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.synfig.org/> (дата обращения: 18.04.2022).
17. Toon Boom. Harmony 21 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.toonboom.com/products/harmony> (дата обращения: 14.04.2022).

*Статья поступила в редакцию 04.06.2022*

*Статья принята к публикации 16.09.2022*

УДК 004.891:681.5

DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0002

## ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ВЫЯВЛЕНИЯ ПРЕДВЕСТНИКОВ ОТКАЗОВ В МИКРОЭЛЕКТРОННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

© Автор(ы) 2022

SPIN: 9941-2749

AuthorID: 850287

ORCID: 0000-0001-6050-6781

ResearcherID: Y-7691-2018

ScopusID: 57223090853

**ТИХОНОВ Мартин Робертович**, кандидат технических наук, доцент института СПИНТех

*Московский институт электронной техники «МИЭТ»*

*(124482, Россия, Москва, город Зеленоград, 352-23, e-mail: kurotenshi91@yandex.ru)*

**Аннотация.** При выполнении производственных и сопроводительных (обеспечивающих) процессов производства изделий микроэлектроники возникают отказы, которые могут приводить к тяжёлым последствиям для предприятия. Для избегания или уменьшения их тяжести целесообразно предусматривать ряд действий, связанных с предупреждением возможных отказов и идентификацией их предвестников. Одним из путей решения данной задачи является применение экспертных систем обнаружения предвестников отказов. В данной работе рассматриваются принципы организации экспертных систем обнаружения предвестников отказов на основе индикаторных показателей. Предложена схема функционирования таких экспертных систем с учётом последовательности расчёта совокупности показателей, включающих показатели воспроизводимости процесса без учета положения, по границам, стабильного по разбросу и настройке процесса, воспроизводимости и стабильности процесса, рассеяния выборочной изменчивости и пр.

**Ключевые слова:** экспертная система, отказ, индикаторный показатель, предвестники отказов, обнаружение предвестников, автоматизированное управление.

## PRINCIPLES OF ORGANIZING THE EXPERT SYSTEM FOR DETECTING PRECURSORS OF FAILURES IN MICROELECTRONIC PRODUCTION

© The Author(s) 2022

**TIKHONOV Martin Robertovich**, candidate of technical sciences, associate professor of the SPINTech institute

*National Research University of Electronic Technology «MIET»*

*(124482, Russia, Moscow, Zelenograd, 352-23, e-mail: kurotenshi91@yandex.ru)*

**Abstract.** When performing production and accompanying (supporting) processes for the production of microelectronic products, failures occur that can lead to serious consequences for the enterprise. To avoid or reduce their severity, it is advisable to provide for a number of actions related to the prevention of possible failures and the identification of their precursors. One of the ways to solve this problem is the use of expert systems for detecting failure precursors. This paper discusses the principles of organizing expert systems for detecting failure precursors based on indicator indicators. A scheme for the operation of such expert systems is proposed, taking into account the sequence of calculating a set of indicators, including indicators of process reproducibility without regard to position, along boundaries, a process that is stable in spread and setting, process reproducibility and stability, dispersion of selective variability, etc.

**Keywords:** expert system, failure, indicators, failure precursors, precursor detection, automated control.

**Для цитирования:** Тихонов М.Р. Принципы организации экспертной системы выявления предвестников отказов в микроэлектронном производстве / М.Р. Тихонов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022. – Т. 11. – № 3(59). – С. 15-18. – DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0002.

**Введение.** Отказы в технологических процессах и автоматизированных системах их управления встречаются относительно редко, так как являются исключительными вариантами развития процесса (побочными цепями), однако их возникновение влияет на возможность достижения запланированного результата и может привести как к временным, так и стоимостным потерям. Бороться с отказами можно по факту их возникновения, т.е. корректирующими действиями, направленными на уменьшение тяжести последствий и устранение их причин для исключения повторного проявления отказа. Однако такой подход приводит к потерям, так как действия

производятся уже после возникновения отказа. Ввиду этого оправданы превентивные меры, направленные на недопущение возникновения отказа, либо существенное уменьшение тяжести последствий отказа.

**Методология.** Целью данной работы является разработка общих принципов организации экспертных систем обнаружения предвестников отказов на основе индикаторных показателей.

Для выбора действий и сроков их исполнения необходимо своевременно выявить предвестники отказа, свидетельствующие о риске отказа в процессе или оборудовании. Одним из вариантов обнаружения предвестников отказов является использование

индикаторных показателей процесса [3, 4], приведённых в стандарте ГОСТ Р ИСО 22514-4-2021:

- $C_p$  – индекс воспроизводимости стабильного по разбросу среднего процесса без учета положения;
- $C_{pU}$  – индекс воспроизводимости стабильного процесса по верхней границе;
- $C_{pL}$  – индекс воспроизводимости стабильного процесса по нижней границе;
- $C_{pk}$  – индекс воспроизводимости стабильного по разбросу и настройке процесса;
- $C_R$  – коэффициент воспроизводимости процесса;
- $P_p$  – индекс пригодности процесса без учета положения среднего;
- $P_{pU}$  – индекс пригодности процесса по верхней границе;
- $P_{pL}$  – индекс пригодности процесса по нижней границе;
- $P_{pk}$  – индекс пригодности процесса с учетом положения среднего;
- $P_R$  – коэффициент пригодности процесса;
- $P_S$  – индекс стабильности процесса;
- $P_d$  – индекс дрейфа центра группирования;
- $P_n$  – индекс нелинейности смещения центра группирования;
- $P_{dR}$  – индекс динамики рассеяния выборочной изменчивости;
- $P_{nR}$  – индекс нестабильности рассеяния выборочной изменчивости;
- $P_{mR}$  – индекс максимального рассеяния.

Данные показатели не свидетельствуют о возникновении отказов напрямую, однако на их основе можно делать ряд логических заключений, связанных с предвестниками отказов и вероятностью их возникновения. Для такого логического перехода необходимы экспертные знания. Экспертные знания служат основой для построения экспертных систем, которые могут рассматриваться как разновидность искусственного интеллекта. Такие системы позволяют автоматизировать процесс выработки решений и/или рекомендаций, а также передавать знания персоналу, не являющемуся носителем этих знаний. Возможность автоматизации и использования индикаторных показателей, связанных непосредственно с параметрами процесса и получаемых из характеристик продукта, позволяют использовать их в автоматизированных системах управления технологическим процессом, упрощая и ускоряя сбор исходных данных для экспертных систем, а также расчёт вероятности возникновения отказа.

Формирование информации о вероятности возникновения отказа основано на логическом заключении, полученном с применением функций принадлежности различных типов, зависящих от индикаторных показателей. Таким образом, в основе экспертных систем обнаружения предвестников заложен аппарат нечеткой логики.

Исходными данными для индикаторных показателей, достаточными для их расчёта, являются:

- $USL$  – верхняя граница допуска;

- $LSL$  – нижняя граница допуска;
- $k$  – коэффициент, зависящий от закона распределения показателя качества процесса и достоверной вероятности;
- $d_2$  – коэффициент, который зависит от объема выборок;
- $x_i$  – результат измерений показателей качества отдельных единиц продукции.

Границы допуска и коэффициенты зачастую напрямую зависят от технологии и не изменяются во времени (за исключением случаев кардинального изменения принципов оценки или выполнения процесса). Показатели качества отдельных единиц продукции варьируются и изменяются как внутри периода оценки, так и за несколько периодов. Для расчёта тренда изменения показателей и уточнения результатов работы экспертной системы с целью получения данных о вероятности возникновения отказа следует оценивать и собирать данные за несколько периодов и сопоставлять индикаторные показатели, рассчитанные по этим данным. Помимо информации о вероятности отказа экспертные системы формируют рекомендации и объяснения получения выходного значения.

**Результаты.** На основе вышеизложенного можно составить модель функционирования экспертной системы обнаружения предвестников отказа (МФЭС), которая состоит из следующих последовательных процессов.

1. Получение и проверка входных данных.
2. Преобразование входных данных.
3. Обработка данных в соответствии с выбранной моделью.
  - 3.1. Фазификация входных данных.
  - 3.2. Формирование логического вывода:
    - 3.2.1. Операция импликации.
    - 3.2.2. Операция композиции.
  - 3.3. Дефазификация данных и получение выходного значения.
4. Формирование и преобразование выходного значения.
5. Формирование и преобразование набора объяснений и рекомендаций.
6. Вывод выходного значения, набора объяснений и рекомендаций.

Получение и проверка входных данных, а также их преобразование связаны с описанными выше исходными данными и индикаторными показателями. На данных этапах происходит расчёт показателей по входам. Аппарат нечеткой логики [7] участвует в процессах обработки данных в соответствии с выбранной моделью. В основу такой модели может быть заложены следующие общепризнанные модели [11]:

- модель нечеткого вывода Мамдани;
- модель нечеткого вывода Ларсена;
- модель нечеткого вывода Теукамото;
- модель нечеткого вывода Сугэно.

Все они при некоторых дополнениях позволяют

экспертной системе обнаружить предвестники отказа на основе значений индикаторных показателей. Остальные этапы участвуют в преобразовании и выводе информации пользователю в понятном

и приемлемом для него виде. Схема потока и преобразования данных, заложенная в модель функционирования экспертных систем обнаружения предвестников отказов, представлена на рисунке 1.

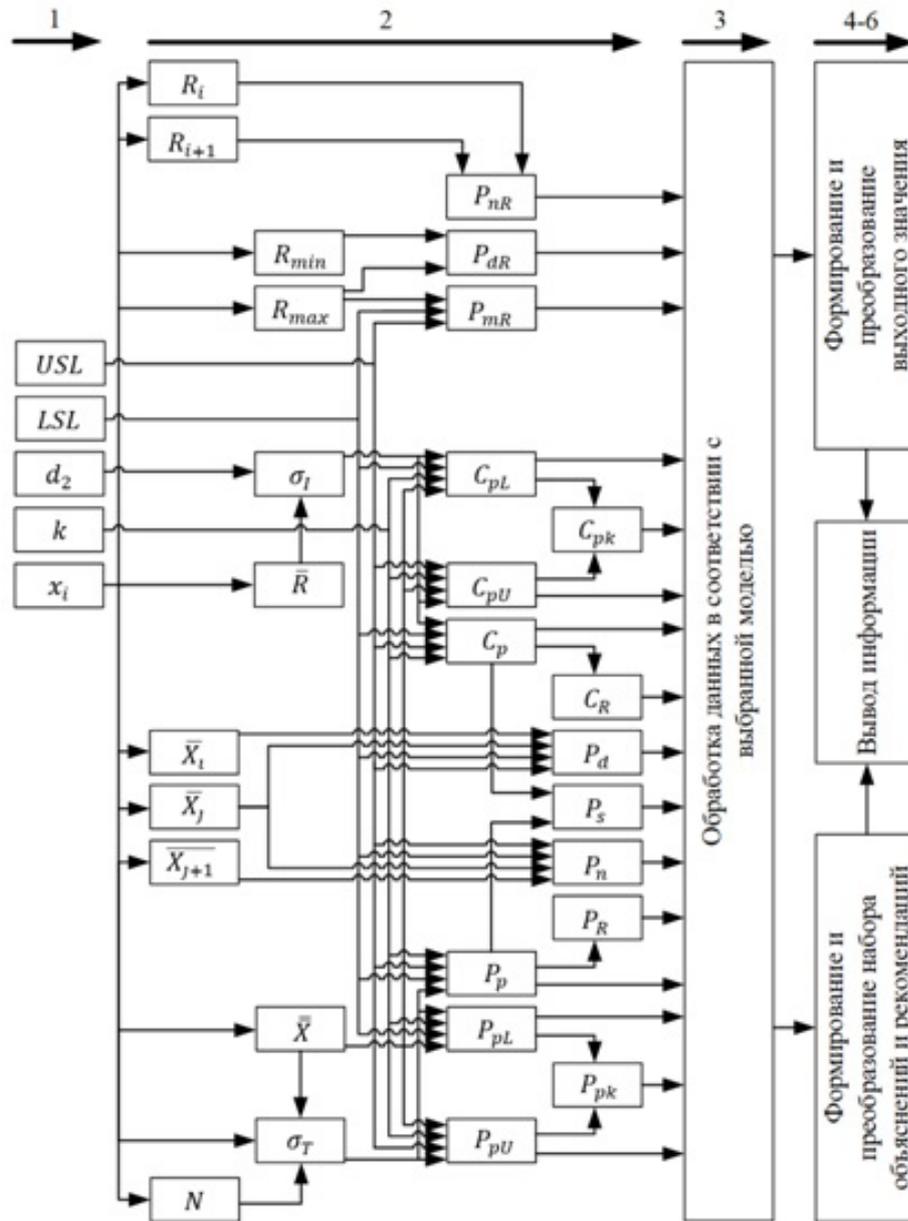


Рисунок 1 – Схема потока и преобразования данных в экспертных системах обнаружения предвестников отказов

В основе обработки данных в соответствии с выбранной моделью лежит общая формула, представленная ниже:

$$f(\{C_p, C_{pU}, C_{pL}, C_{pk}, C_R, P_p, P_{pU}, P_{pL}, P_{pk}, P_R, P_s, P_d, P_n, P_{dR}, P_{nR}, P_{mR}\}_{T, \dots}, \{C_p, C_{pU}, C_{pL}, C_{pk}, C_R, P_p, P_{pU}, P_{pL}, P_{pk}, P_R, P_s, P_d, P_n, P_{dR}, P_{nR}, P_{mR}\}_{-kT}) = \{P, R\}$$

где  $f$  – функция, основанная на нечеткой логике, а входящие в выражение переменные представляют собой перечисленные выше индексы. Из этого выражения следует, что на основе функции нечёткой логики происходит преобразование данных инди-

каторных показателей за несколько периодов в значение вероятности возникновения отказа и множество рекомендаций по отказам.

**Обсуждение.** Рассмотренные индикаторные показатели могут быть заменены на показатели надёжности или показатели теории очередей в зависимости от специфики объекта оценки. При этом приведённые аргументы в пользу структуры системы не нуждаются в существенных изменениях в части реализации решающей системы с нечёткой логикой. Изменения коснутся последовательности расчётов связанных показателей и математических переходов.

Таким образом, приведённые принципы функционирования экспертных систем могут быть использованы не только для обнаружения предвестников отказов, но и в прочих специальных системах и системах общего назначения с нечёткой логикой.

**Выводы.** Применение нечёткой логики в рамках экспертных систем обнаружения предвестников отказов на основе индикаторных показателей способно составить основу экспертных систем обнаружения предвестников отказов. Рассмотренные в работе принципы могут быть взяты за основу построения таких экспертных систем и прочих специальных и общих программных продуктов, построенных на основе нечёткой логики.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Stuglik, J. Normalization of reproducibility and suitability indexes for assessment of products or production services quality / J. Stuglik, I.P. Kurytnik, O.M. Vasilevskyi, V.YU. Kucheruk, P.I. Kulakov, S.S. Kassymov, A.K. Khassenov, D.ZH. Karabekova // Bulletin of the Karaganda university. Physics series. – 2020. – P. 28-38
2. Долгов, Д.В. Программная реализация нечеткой модели Мамдани в системах охраны окружающей среды // Наука сегодня глобальные вызовы и механизмы развития. Материалы международной научно-практической конференции. – 2019. – С. 31-32.
3. Смелов, В.Ю. Влияние вариабельности системы измерений на оценку качества процессов с помощью индексов воспроизводимости / В.Ю. Смелов, Е.И. Хунузиди, Е.А. Ахметова, В.Л. Шпер // Контроль качества продукции. – 2022. № 5. – С. 45-53.
4. Шпер, В.Л. Индексы воспроизводимости процессов - зачем они нужны и как их применять? // Контроль качества продукции. – 2020. № 3. – С. 46-54.
5. Минченко, Т.А. Определение индекса воспроизводимости через неопределенность // XXV Региональная конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области. Сборник материалов конференции. – Волгоград, 2021. – С. 64-66.
6. Скаков, А.С. Анализ показателей индексов воспроизводимости процесса // Тенденции развития современной науки. сборник трудов научно-практической конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета : в 2 ч.. – Липецк, 2021. – С. 114-116.
7. Кравец, Е.В. Анализ понятия "нечеткая логика", методы и области применения нечеткой логики / Е.В. Кравец, О.С. Солодова // "ЦИФРА" - реальность, меняющая мир: готовность Российской экономики к новым правилам игры. Материалы Национальной научно-практической конференции. – 2019. – С. 110-112.
8. Леонов, О.А. Оценка воспроизводимости и пригодности контрольных процессов при ремонте машин / О.А. Леонов, Н.Ж. Шкаруба // Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития. Материалы международной научно-практической конференции. – Красноярск, 2021. – С. 151-153.
9. Палюх, Б.В. Реализация экспертной системы для оценки инновационности технических решений / Б.В. Палюх, В.К. Иванов, И.В. Образцов // Программные продукты и системы. – 2019. – № 4. – С. 696-707.
10. Мухамедов, Р.Н. Формирование облика экспертной системы реального времени для системы предупреждения аварий на промышленных предприятиях // НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ. Сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции. – Ответственный редактор: Сукиасян Асатур Альбертович. – 2019. – С. 49-52.
11. Сухарева, М.А. Построение экспертных систем с применением технологий искусственного интеллекта как системы поддержки принятия управленческих решений / М.А. Сухарева, М.В. Виниченко // Новое поколение. 2019. – № 20. – С. 77-83.
12. Асылбеков, Н.С. Диагностика неисправностей цифровых систем с применением экспертной системы / Н.С. Асылбеков, Г.Ж. Кыдыралиева, Н.Д. Джумадилдеева, Э.А. Магазимов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2020. № 1. – С. 15-20.
13. Кассиала, А.Н. Разработка экспертной системы оценки техногенного риска информационно-измерительной системы АСУ ТП // СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ: ДОСТИЖЕНИЯ И ИННОВАЦИИ-2020. Сборник материалов II Всероссийской научно-практической конференции. – 2020. – С. 419-420.
14. Шукуров, И.И. Экспертные системы и системы поддержки принятия решений / И.И. Шукуров, В.Ф. Шуршев // 64-я Международная научная конференция Астраханского государственного технического университета, посвященная 90-летию юбилею со дня образования Астраханского государственного технического университета. материалы конференции. – 2020. – С. 167.
15. Мандраков, Е.С. Область применения экспертных систем в системах менеджмента качества // 19-я Международная конференция «Авиация и космонавтика». Тезисы 19-ой Международной конференции. Москва, 2020. – С. 286-287.
16. Костюков, А.С. Применение помехоустойчивого кодирования в экспертных системах / А.С. Костюков, А.В. Башкиров, Н.В. Астахов, А.С. Демихова, Л.Н. Никитин // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2020. – Т. 1. С. 90-92.
17. Дзауров, М.А. Информационная технология экспертных систем // Студенческий вестник. 2021. № 32-2 (177). – С. 53-54.
18. Тихонов, М.Р. Применение процессного подхода для комбинирования технологий оценки рисков / М.Р. Тихонов, М.В. Акуленок, О.С. Шикуча // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. – 2021. – № 11. – С. 108-112.
19. Тихонов, М.Р. Разработка автоматизированного модуля построения контрольных карт управляемости процессов на базе программного пакета MATLAB / М.Р. Тихонов, М.В. Акуленок, О.С. Шикуча // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. – 2021. – № 12. – С. 160-165.
20. Тихонов, М.Р. Анализ особенностей автоматизации процесса управления рисками в производственных и технологических процессах // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. – 2019. – № 4. – С. 93-97.

*Статья поступила в редакцию 06.06.2022*

*Статья принята к публикации 16.09.2022*

УДК 519.6

DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0003

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОЛЩИНЫ И СВОЙСТВ УГЛЕГРАФИТОВОГО ВОЛОКНИСТОГО МАТЕРИАЛА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОВОССТАНОВЛЕНИЯ ИОНОВ ЖЕЛЕЗА НА ПРОТОЧНОМ ТРЕХМЕРНОМ ЭЛЕКТРОДЕ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

© Автор(ы) 2022

SPIN-код: 1569-1966

AuthorID: 47930

ORCID: 0000-0003-3057-4980

ResearcherID: AAD-1496-2021

ScopusID: 8900920000

**КОШЕВ Александр Николаевич**, доктор химических наук,  
профессор кафедры «Информационно-вычислительные системы»  
*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*  
(440028, Россия, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28, e-mail: koshev@pguas.ru)

SPIN-код: 4008-3010

AuthorID: 43826

ORCID: 0000-0001-8622-9364

ResearcherID: A-0000-0000

ScopusID: 7004176778

**ВАРЕНЦОВ Валерий Константинович**, доктор технических наук, профессор,  
ведущий научный сотрудник лаборатории электрохимии гетерогенных систем  
*Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН*  
(630128, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 18, e-mail: vvk@ngs.ru)

SPIN-код: 9075-4096

AuthorID: 642415

ORCID: 0000-0003-4511-7176

ResearcherID: GOP-3388-2022

ScopusID: 57190165261

**КУЗИНА Валентина Владимировна**, кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Информационно-вычислительные системы»  
*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*  
(440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28, e-mail: kuzina@pguas.ru)

**Аннотация.** Приводится исследование влияния различных параметров процесса электровосстановления ионов железа на проточном трехмерном электроде методом математического моделирования. Цель исследования – подбор параметров, позволяющих обеспечить высокую производительность электрохимического процесса на проточных трехмерных электродах (ПТЭ), в том числе из углеродных волокнистых материалов (УВМ). Рассмотрено влияние увеличения толщины углеродных волокнистых электродов (УВЭ) на производительность процессов, анализируется влияние степени сжатия УВЭ на исследуемый процесс. В результате выполненного исследования показано, что, несмотря на резкое снижение значений поляризации и плотности тока в глубине электрода, часть его внутренней поверхности, на которой протекает реакция, с увеличением толщины  $L$  электрода, возрастает, однако при этом суммарная внутренняя поверхность электрода, работающая достаточно эффективно, остается неизменной, что приводит к постоянству скорости процесса в этих условиях. Производительность электрохимических процессов определяется величиной поверхности электрода, работающей в условиях предельного диффузионного тока по ионам основного электроактивного компонента. Установлено также, что максимум производительности процесса приходится на сжатие УВЭ в 2,0 – 2,2 раза. Показано влияние на скорость электрохимических процессов свойств материала катода. Для сопоставления работы электродов из разных видов УВМ приводятся результаты моделирования распределения поляризации, тока и концентрации в их объеме. Результаты моделирования дают основание предположить, что скорость реакции будет наиболее высокой на УВМ марки ТВШ. Для других исследованных материалов представляется возможным некоторое снижение толщины электрода без существенного влияния на скорость процесса, поскольку в них наблюдаются внутренние зоны с незначительной поляризацией.

**Ключевые слова:** трехмерный проточный электрод, электровосстановление ионов железа, математическое моделирование, углеграфитовые волокнистые материалы, подбор параметров.

**RESEARCH OF IMPACTS OF THE THICKNESS AND FEATURES OF CARBON-GRAPHITE FIBROUS MATERIAL ON THE EFFICIENCY OF ELECTRICAL RECOVERY OF IRON IONS ON A FLOWING THREE-DIMENSIONAL ELECTRODE BY MATHEMATICAL SIMULATION METHODS**

© The Author(s) 2022

**KOSHEV Alexander Nikolaevich**, doctor of Chemistry Science,  
professor of the department «Information and computing systems»

*Penza State University of Architecture and Construction*  
(440028, Russia, Penza, German Titov St., 28, e-mail: koshev@pguas.ru)

**VARENTSOV Valery Konstantinovich**, doctor of technical Sciences, professor,  
leading researcher Laboratory of Electrochemistry of Heterogeneous Systems

*Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry of Siberian branch of Russian Academy of Science*  
(630128, Russia, Novosibirsk, st. Kutateladze, 18, e-mail: vvk@ngs.ru)

**KUZINA Valentina Vladimirovna**, candidate of Technical Sciences,  
associate professor of the department «Information and computing systems»

*Penza State University of Architecture and Construction*  
(440028, Russia, Penza, German Titov St., 28, e-mail: kuzina@pguas.ru)

**Abstract.** The following research represents the influence of various parameters of the process of electrical recovery of iron ions on a flowing three-dimensional electrode by the methods of mathematical modeling. The purpose of this research is to select the parameters which make it possible to ensure the high performance of the electrochemical process on flowing three-dimensional electrodes (FTE), including those made of carbon fiber materials (CFM). The effect which causes the increase of the thickness of carbon fiber electrodes (CFE) on the productivity processes is considered, and the effect which causes the degree of CFE compression was analyzed in this research. As a result of the research, it was shown that, despite a sharp decrease in the values of polarization and current density in the depth of the electrode, the part of its inner surface, on which the reaction occurs, increases with an increase in the thickness  $L$  of the electrode, however, the total inner surface of the electrode, which works quite efficiently, still remains unchanged, which leads to the constancy of the process rate under these conditions. The productivity of electrochemical processes is determined by the size of the electrode surface operating under the conditions of the current limited diffusion through the ions of the main electro active component. It has also been analyzed that the maximum productivity of the process falls on UHE compression by 2.0 – 2.2 times. It is shown the influence of the characteristics of the cathode material on the rate of electrochemical processes. To compare the operation of electrodes from different types of CCMs, the results of mathematical modeling are presented of the distribution of current polarization and the concentration in their volumes. The simulation results provide the subject to assume that the reaction rate will be the highest on TVSh grade of CFM. In other studied materials, it seems possible to slightly reduce the thickness of the electrode without a significant effect on the rate of the process, since internal zones with insignificant polarization are observed in them.

**Keywords:** flowing three-dimensional electrode, electroreduction of iron ions, mathematical modeling, carbon-graphite fibrous materials, selection of parameters.

*Для цитирования:* Кошев А.Н. Исследование влияния толщины и свойств углеграфитового волокнистого материала на эффективность электровосстановления ионов железа на проточном трехмерном электроде методами математического моделирования / А.Н. Кошев, В.К. Варенцов, В.В. Кузина // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022. – Т. 11. – № 3(59). – С. 19-25. – DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0003.

**Введение.** При решении задачи повышения эффективности электрохимических систем с проточными трехмерными электродами (ПТЭ) возникает проблема обеспечения равномерного распределения потенциала по толщине электрода, позволяющего интенсифицировать процесс электроизвлечения металлов путем оптимизации токового и гидродинамического режима электролиза, а также оптимизации конструктивных параметров ПТЭ, таких, например, как толщина или удельная электропроводность электрода. Распределение потенциала, в свою очередь, определяется кинетикой электродного процесса, зависящей от электрохимических характеристик электролита и электрода, а также выбранными параметрами режима процесса электроосаждения.

Таким образом, для совершенствования работы электрохимических систем с ПТЭ необходимы исследования влияния на эффективность электрохимических процессов различных составляющих

процесса электролиза, а также определение наиболее благоприятных режимов осаждения.

Вопросы изучения методов электровосстановления ионов различных металлов актуальны и представлены в работах многих исследователей [1 – 6 и др.], однако значимых результатов в части электрохимического процесса восстановления ионов железа на проточных трехмерных электродах из волокнистых углеграфитовых материалов математическими методами не получено. Метод математического моделирования, описанный, например, в работах [7, 8] позволяет исследовать процесс электровосстановления ионов железа на проточном трехмерном электроде в динамике, а также проанализировать влияние различных параметров процесса на эффективность с целью оптимизации условий электролиза [9, 10]. Анализ последних публикаций [11–20], в которых рассматривались свойства и применимость проточных трехмерных материалов в качестве электродов, показывает

целесообразность исследований этой проблемы для электрохимического процесса восстановления ионов железа.

**Методология.** Цель исследования – посредством математического моделирования и численных расчетов определить значения электрохимических и технологических параметров, обеспечивающих достаточную интенсивность и производительность процесса электролиза в проточных трехмерных электродах из углеродных волокнистых материалов. В частности, в данной работе рассмотрено влияние на процесс электровосстановления железа до металлической формы таких параметров, как толщина с учетом ее сжатия, а также свойства материала катода, выполненного из углеродных волокнистых материалов (УВМ).

Математические описания, модели и методы вычислений приведены, например, в работах авторов [8-11], в которых моделируются процессы восстановления  $n$  компонентов в объеме пористого электрода, с учетом того, что при протекании процессов на УВЭ преимущественный перенос массы и заряда проходит путем принудительной конвекции, когда диффузией и естественной конвекцией можно пренебречь. В данной работе были выполнены численные решения систем дифференциальных, интегральных и алгебраических уравнений с использованием математической модели, соответствующей процессу восстановления железа до металлической фазы, определяемому электрохимическими реакциями вида  $Fe(III) + e \rightarrow Fe(II)$ ;  $Fe(II) + 2e \rightarrow Fe^0$ .

Математическая модель для расчета данной электрохимической системы на ПТЭ основана на научном представлении о движении ионов трех и двухвалентного железа в электрическом поле с учетом конвективного переноса:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -div(z_i \mu_i F C_i grad(U) + C_i v). \quad (1)$$

В этом уравнении  $z_i$ ,  $C_i$ ,  $\mu_i$  – соответственно, заряд, концентрация (Моль/см<sup>3</sup>) и подвижность  $i$ -го электроактивного компонента в псевдогомогенной среде;  $F$  – число Фарадея (Кл\*моль<sup>-1</sup>),  $div$  – обозначение дивергенции;  $grad(U)$  – обозначение градиента потенциала электрического поля (В);  $v$  – скорость потока электролита на входе в электролизер.

Уравнение (1) может быть преобразовано в соответствие с правилами применения дифференциальных операторов, и для одномерного случая, который соответствует рассматриваемой технологической задаче будет иметь вид соответствующий следующей дифференциальной системе:

$$\frac{d^2 U}{dx^2} = S_V \left( \frac{1}{z_T(x)} + \frac{1}{z_C(x)} \right) (j_M(x) + j_H(x)); \quad (2)$$

$$|v| z F \frac{\partial C}{\partial x} = -S_V j_M(x), \quad (3)$$

Здесь  $S_V$ ,  $j_M$ ,  $j_H$ ,  $\chi_T$ ,  $\chi_C$  – соответственно, реакционная поверхность (см<sup>2</sup>/см<sup>3</sup>), парциальные плотности тока по ионам металла и водород (А/см<sup>2</sup>), удельные электропроводности материала электрода и раствора.

Свободная переменная  $x$  соответствует координате по толщине ПТЭ.

Для стационарного случая, преобразуя уравнение (1), получим систему дифференциальных уравнений:

$$\frac{\partial(x \frac{dv}{dx})}{\partial x} + v F \sum z_i \frac{\partial C_i}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} F \sum z_i C_i = 0, \quad (4)$$

$$|v| \frac{\partial C_i}{\partial n} = -\frac{S_V}{z_i F} j_{Si}. \quad (5)$$

Здесь  $j_{Si}$  – плотность поляризующего тока по  $i$ -му компоненту (см<sup>2</sup>/см<sup>3</sup>),  $n$  – направление движения электролита,  $\chi$  – величина, характеризующая электропроводные свойства системы (См/см).

Система уравнений (4) – (5) должна быть дополнена поляризационными кинетическими уравнениями, связывающими значения плотностей тока и потенциала в точке  $x$ :

$$j_{Si}(x) = j_{oi} \frac{e^{\frac{\alpha_i z_i F (U - \phi_{Ri})}{RT}} - e^{\frac{(\alpha_i - 1) z_i F (U - \phi_{Ri})}{RT}}}{1 + \frac{j_{oi} e^{\frac{\alpha_i z_i F (U - \phi_{Ri})}{RT}}}{z_i F \chi_{mi} C_i}} \quad (6)$$

с начальными и граничными условиями, накладываемыми на неизвестные функции:

$$\frac{\partial U}{\partial x}(0) = I \rho_T; \quad \frac{\partial U}{\partial x}(L) = I \rho_G; \quad C_i(0) = C_{i0}. \quad (7)$$

Здесь  $I$  – габаритная плотность тока (А/см<sup>2</sup>), проходящего через электрод,  $L$  – толщина ПТЭ.

Следует отметить, что уравнение (5) для концентрации второго электроактивного компонента ( $Fe^{+2}$ ) рассматриваемой электрохимической системы  $Fe(III)/Fe(II)/Fe$  должно быть существенно преобразовано, поскольку в силу электродной реакции  $Fe^{+3} \rightarrow Fe^{+2}$  в процессе восстановления трехвалентного железа до двухвалентного с течением времени концентрация двухвалентного железа в электролите будет меняться.

Направление протока электролита в рассматриваемом случае проведения электролиза совпадает с направлением распределения плотности тока –  $x$ , поэтому уравнение (5) может быть записано в виде

$|v| \frac{dC_i}{dx} = -\frac{S_V j_{Si}}{z_i F}$ . Изменение концентрации первого компонента электродной реакции ( $Fe^{+3}$ ) можно рассчитать по формуле:  $|v| = -\frac{S_V j_{S1}}{z_1 F} dx$ , либо в конечно-разностной форме:  $\Delta C_1(x_i) = -\frac{S_V}{|v| z_1 F} j_{S1} \Delta x_i$ .

Очевидно, что отрицательное приращение концентрации трехвалентного железа в точке электрода  $x_i$  равно приращению концентрации двухвалентного железа в той же точке. Следовательно, разностное уравнение для концентрации двухвалентного железа из группы (5) можно записать в виде  $\Delta C_2(x_i) = \left( \frac{S_V}{|v| z_1 F} j_{S1} + \frac{S_V}{|v| z_2 F} j_{S2} \right) \Delta x_i$ .

В этом случае моделирующее уравнение (5) для расчета распределения концентрации  $Fe^{+2}$  на ПТЭ, примет следующий вид  $|v| \frac{dC_2}{dx} = \frac{S_V}{F} \left( \frac{j_{S1}}{z_1} + \frac{j_{S2}}{z_2} \right)$ .

Решение системы дифференциальных уравнений (4) – (7) позволяет рассчитывать искомые электрохимические функции  $U(t, x)$ ,  $C_i(t, x)$ . Методы решения означенной системы описаны, например, в работе [10], при этом учитывалась возможность изменения электрохимических параметров в процессе электро-

лиза. С этой целью разработаны алгоритмы их пересчета с течением времени процесса в каждой точке по толщине ПТЭ.

**Результаты.** Состав электролита, для которого проводились численные и экспериментальные исследования, выбран следующим: концентрация ионов  $Fe(II)$  постоянна и равна 2,5 моль/л, концентрация ионов  $Fe(III)$  варьировалась в пределах от  $1,8 \cdot 10^{-3}$  до  $1,8 \cdot 10^{-1}$  моль/л. Электропроводность раствора составила  $\chi_{ж} = 0,14$  См/см. Катоды в ПТЭ были выполнены из УВМ следующих марок: ВИНН-250, НТМ-100, НТМ-200, ВВП-66-95, КНМ, ВНГ-50, ТГН и ТВШ. Электрохимические характеристики для перечисленных марок УВМ, такие как удельная реакционная поверхность электрода  $S_v$ , ( $см^2/см^3$ ), электропроводность электрода  $\chi$ , ( $См/см^{-1}$ ) и пористость материала электрода ( $\epsilon$ ) известны и приведены, например, в литературных источниках [12, 13]. Плотность поляризующего тока  $j$ , ( $А/см^2$ ) и начальная скорость потока электролита  $u$ , ( $см/с$ ) задавалась в соответствии с задачами исследований.

**Выбор толщины электрода.** Одним из определяющих факторов эффективности процессов в системах с ПТЭ является реакционная поверхность материала катода. Увеличение реакционной поверхности ПТЭ возможно, очевидно, при увеличении размеров электролизера и, в частности, увеличением его толщины. Однако, увеличение толщины углеродистых катодов лимитируется возникновением областей с малой интенсивностью процесса электроосаждения вплоть до возникновения анодной зоны на катодно поляризованном электроде [15]. Целесообразно стремиться к достижению максимальной производительности электролиза, которая определяется поверхностью электрода, работающей на предельном диффузионном токе по ионам извлекаемого в ПТЭ металла [13].

На рисунке 1 приведена расчетная кривая зависимости  $C_0/C_t$  при росте толщины электрода  $L$ . Результаты показывают, что с возрастанием толщины электрода возрастает производительность процесса  $Fe(III) + e \rightarrow Fe(II)$  с дальнейшей стабилизацией концентрации ионов  $Fe(II)$  при значениях  $L = 0,1 \dots 0,3$  см. Такая закономерность объясняется расширением зоны минимума поляризации с ростом толщины электрода, что и ограничивает рост продукта реакции  $Fe(III) + e \rightarrow Fe(II)$

На рисунке 2(а, б) кривые 5 иллюстрируют интересное как с точки зрения теории, так и с позиций практики, явление – появление области с анодной реакцией окисления ионов  $Fe(II)$  до  $Fe(III)$  на катодно поляризованном электроде. Закономерности возникновения такого явления описаны в работах [14, 15] и обуславливаются существенной неравномерностью распределения поляризации на ПТЭ, что приводит к смещению процессов восстановления металла на края электрода вследствие значительного роста электропроводности электрода в областях у токоподвода и токоотвода и малому росту элект-

ропроводности в средней части ПТЭ. В силу описанного явления при увеличении толщины электрода до 2 см поляризация электрода смещается в электроположительную сторону  $Fe(II)$  до  $Fe(III)$ .

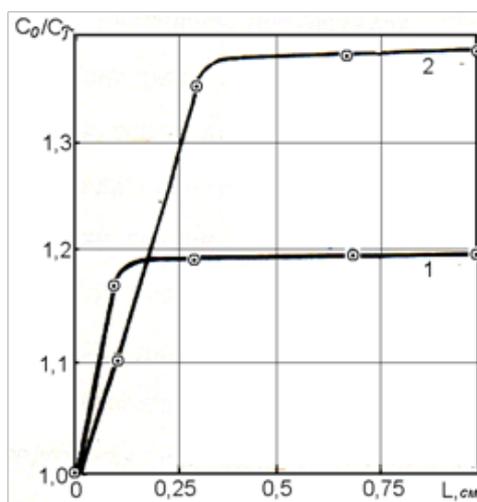


Рисунок 1 – Зависимость величины  $C_0/C_t$  от толщины ПТЭ –  $L$  при различных значениях габаритной плотности тока ( $А/м^2$ ): 1 – 500; 2 – 1000. Материал катода – ВИНН-250; скорость потока электролита  $u = 0,36$  мл/с; исходная концентрация трехвалентного железа  $8,9 \cdot 10^{-3}$  моль/л

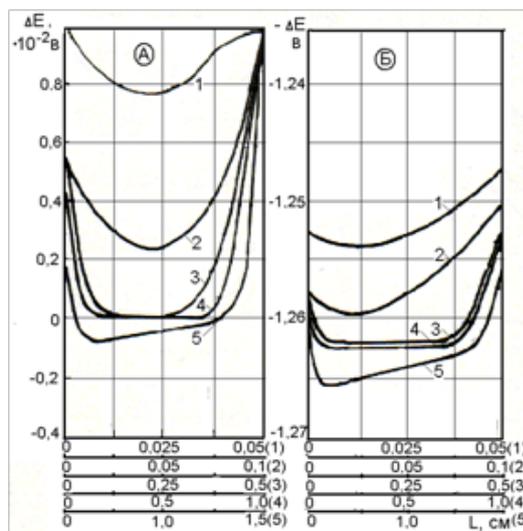


Рисунок 2 – Распределения парциальных поляризаций реакций вида  $Fe(III) + e \rightarrow Fe(II)$  (А) и  $Fe(II) + 2e \rightarrow Fe^0$  (Б) при различных значениях толщины ПТЭ, (см): 1 – 0,05; 2 – 0,1; 3 – 0,5; 4 – 1,0; 5 – 2,0

Из результатов численных расчетов можно сделать вывод о существовании некоторого оптимального значения толщины электрода, при котором ПТЭ работает наиболее эффективно.

Анализ показывает, что распределения поляризации электродных реакций  $Fe(II) + 2e \rightarrow Fe^0$  и  $Fe(III) + e \rightarrow Fe(II)$  имеют сходный характер и, следовательно, процесс извлечения металлического железа наиболее эффективен при небольшой толщине ПТЭ, причем преимущественно на фронтальной стороне электрода. На рисунке 3 представлены кривые распределения парциальных токов и концентраций

рассматриваемых реакций восстановления ионов железа, полностью подтверждающие этот вывод.

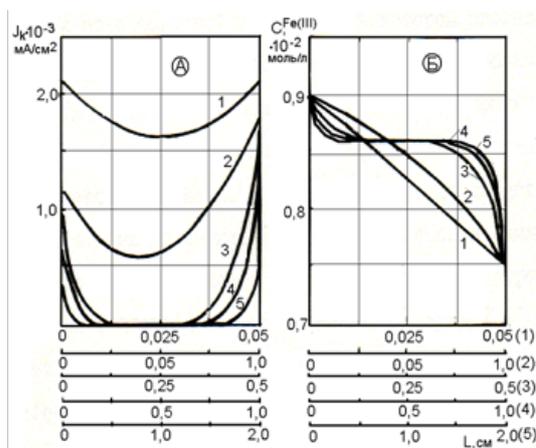


Рисунок 3 – Распределение парциальных локальных плотностей тока реакций  $Fe(III) + e \rightarrow Fe(II)$  (А) и  $Fe(II) + 2e \rightarrow Fe^0$  (Б) и концентрации ионов  $Fe(III)$  при различных значениях толщины ПТЭ (см): 1 – 0,05; 2 – 0,1; 3 – 0,5; 4 – 1,0; 5 – 2,0

Анализ представленных на рисунках 1 – 3 численных расчетов, а также результатов многочисленных расчетов, не приведенных в данном сообщении из соображений лаконичности, дает возможность заключить, что оптимальная толщина ПТЭ для наибольшей эффективности его работы находится в пределах 0,15 – 0,30 см.

Проведенное численное моделирование позволило оценить влияние степени сжатия УВЭ на эффективность процессов восстановления железа на ПТЭ. Показано, что наиболее эффективным представляется сжатие материала катода примерно в два раза, дальнейшее сжатие материала приводит к снижению производительности процесса несмотря на значительный рост реакционной поверхности ПТЭ (например, при сжатии материала в пять раз для материала ВИНН-250 реакционная поверхность увеличивается также в пять раз). При увеличении сжатия до 2,0 – 2,2 раза интенсивность работы части поверхности ПТЭ уменьшается, и поляризация в глубине электрода снижается. Распределение плотности тока аналогично соответствующим изменениям поляризации, однако при этом значения поляризации и плотности тока на тыльной стороне увеличиваются, что приводит к ускорению целевого процесса в этих условиях. При увеличении степени сжатия в три и более раз происходит увеличение неравномерности распределения поляризации внутри электрода с одновременным уменьшением ее значений на сторонах УВЭ и, соответственно, снижение общей поверхности электрода, на которой целевой процесс идет с достаточной скоростью.

**Влияние вида материала катода.** В статье [16] приведен анализ накопленной обширной информации о роли материала электрода в электрохимических процессах. Электрод практически участвует в редокс-процессе, являясь своего рода универсальным

реагентом, заменяющим множество химических восстановителей и окислителей. Природа материала электрода при этом является важным фактором, определяющим свойства этого реагента. Как известно [11, 12], углеродные волокнистые материалы разных промышленных марок имеют различные электрохимические свойства существенно влияющие на скорость процессов электрохимической обработки железосодержащих растворов. Для сопоставления работы электродов из разных видов УВМ авторами проведены численные исследования распределения основных электрохимических функций: поляризации, тока и концентрации в ПТЭ.

На рисунке 4(а) приведены рассчитанные профили концентрации и поляризации  $Fe(III)$  по толщине ПТЭ для следующих условий электролиза: исходная концентрация  $8,9 \cdot 10^{-3}$  моль/л;  $u = 0,36$  мл/с; габаритная плотность тока  $500$  А/м<sup>2</sup>. Результаты расчетов показывают, что процесс восстановления трехвалентного железа до двухвалентного в заданных условиях наиболее равномерно распределяется по объему электрода при использовании УВМ марки ТВШ. Для всех других марок УВМ изучаемый процесс наиболее интенсивно протекает на тыльной и фронтальной стороне электрода, при этом центральная часть электрода работает не эффективно.

Приведенные на рисунке 4(б) профили распределения поляризации на ПТЭ для случая указанных ранее марок УВМ аналогичны результатам предыдущего исследования, они свидетельствуют о существенном отличии распределения процессов восстановления на электроде из УВМ марки ТВШ от материалов других марок. При этом, как и в предыдущем случае, правомерно сделать вывод о значительно большей эффективности процесса электрохимического восстановления железа при использовании в качестве материала катода УВМ марки ТВШ.

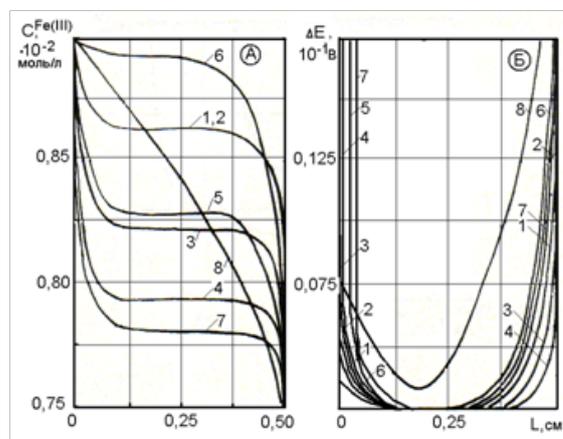


Рисунок 4 – Распределение концентрации ионов  $Fe(III)$  (А) и поляризации (Б) по толщине ПТЭ для различных марок углеродных волокнистых материалов: 1 – ВИНН-250; 2 – НТМ-200; 3 – НТМ-100; 4 – ВВП-66-95; 5 – ТНГ; 6 – ВНГ-50; 7 – КНМ; 8 – ТВШ

При использовании в качестве материала катода

УВМ других материалов представляется необходимым уменьшение толщины электрода, что, по-видимому, не приведет к существенному снижению общей скорости процесса из-за более эффективного использования срединной области ПТЭ в силу улучшения равномерности распределения локальных плотностей тока по толщине ПТЭ.

**Обсуждение.** Изучение электрохимических процессов экспериментальным путем даже для самых простых электрохимических систем представляет собой сложную, трудоемкую задачу, для решения которой необходимо тонкое дорогостоящее оборудование и материалы. Сами исследования необходимо производить в условиях хорошо оборудованных химических лабораторий с соответствующей системой техники безопасности. В силу сказанного, использование математического моделирования и численных расчетов является привлекательным методом для исследователей. Однако для разработки математических моделей, адекватно описывающих реальные физико-химические процессы, необходимо исходить из электрохимической теории, которая не всегда достаточно развита для определенного вида электрохимических процессов. К таким процессам можно отнести окислительно-восстановительные процессы в объеме проточных трехмерных электродов. Тем не менее, в литературе имеются работы, посвященные исследованиям процессов в ПТЭ (см., например, работу [21] и библиографию к ней). Однако все доступные статьи, как в отечественных, так и в зарубежных журналах рассматривают электрохимические системы с одним, максимум двумя электроактивными компонентами, чего явно недостаточно для описания электрохимических процессов в ПТЭ. Модели, составленные и используемые авторами настоящей статьи, способны описывать процессы с любым количеством электродных реакций. Кроме того, разработанные модели позволяют описывать многостадийные процессы восстановления компонентов электролитов, что было применено в настоящей работе и позволило получить выводы, имеющие значения как для теории, так и для практики реальных электрохимических процессов.

**Выводы.** В результате математического моделирования распределения электроактивных компонентов при электровосстановлении ионов железа на проточном трехмерном электроде, выполненных численных экспериментов и экспериментальных исследований выявлено характерное влияние таких параметров, как толщина электрода, степень сжатия объемно-пористого катода из УВМ, а также свойств материала катода на производительность электрохимического процесса в электролизерах с проточными трехмерными электродами. Определены оптимальные численные значения рассмотренных характеристик электрода и электролита, представлены рекомендации по использованию различных марок материалов катода, позволяющие интенсифицировать электролиз и в целом повысить эффективность

изучаемых процессов.

Результаты выполненных исследований показывают эффективность использования методов математического моделирования для решения задач, подобных рассмотренным в настоящей работе, и обосновывают дальнейшее совершенствование математических моделей, методов расчетов и компьютерных процедур.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Варенцов В.К., Варенцова В.И. Электролиз с углеродными волокнистыми электродами в процессах извлечения платиновых металлов из минерального и техногенного сырья // Журнал прикладной химии. – 2020. Т. 93. № 7. – С. 1033-1042.
2. Варенцов В.К. Электролиз с объёмно-пористыми проточными электродами в гидротехнологии благородных металлов // Изв. СО АН СССР. Сер. хим. наук. – 1984. № 17, вып. 6. – С. 106-120.
3. Ковалева О.В. Электрохимическое исследование редокс-процессов в железодержащих водных растворах // Revista științifică a Universității de Stat din Moldova «Studia Universitatis», Seria «Științe ale Naturii». – 2009. № 6 (26). – Рр. 195-203.
4. Ивашкин Ю.А., Плескачева О.Ю., Бокова Д.Ю. Получение мелкодисперсного порошка железа // Агротехника и энергосбережение. – 2017. № 2 (15). – С. 38-43.
5. Перельгин Ю.П., Киреев С.Ю., Кирилина Ю.Н. Реакции на катоде при электроосаждении металлов // Гальванотехника и обработка поверхности. – 2019. Т. 27. № 4. – С. 28-32.
6. Варенцов В.К., Кошев А.Н., Сухов И.Ф. Процессы совместного электроосаждения золота и серебра из серно-кислых растворов на проточном электроде // Теоретические основы химической технологии. – 2018. Т. 52. № 4. – С. 391-402.
7. Математическое моделирование и теория распределения поляризации в электрохимических реакторах с проточными объемно-пористыми катодами / А.Н. Кошев, В.К. Варенцов, М.А. Чиркина, В.Г. Камбур // Математическое моделирование. – 2011. Т. 23. № 8. – С. 110-126.
8. Кошев А.Н., Кузина В.В. Разработка и исследование математических моделей нестационарных процессов в электрохимических реакторах с проточными трехмерными электродами: моногр. Пенза: ПГУАС. – 2011. – 119 с.
9. Окислительно-восстановительные процессы на трехмерных электродах. Математическое моделирование, теория, эксперимент: моногр. / В.К. Варенцов, А.Н. Кошев, В.И. Варенцова, В.В. Кузина. Пенза: ПГУАС. – 2020. – 172 с.
10. Варенцов В.К., Кошев А.Н., Варенцова В.И. Современные проблемы электролиза и задачи оптимизации процессов в реакторах с трехмерными углеродными электродами: моногр. Пенза: ПГУАС. – 2015. – 286 с.
11. Углеродные волокнистые электроды: свойства, модификация, процессы и электролизеры. Математическое моделирование и оптимизация: моногр. / В.К. Варенцов, А.Н. Кошев, В.И. Варенцова, В.В. Кузина. Пенза: ПГУАС. – 2021. – 176 с.
12. Варенцов В.К., Жеребилов А.Ф., Малей М.Д. Углеродные волокнистые материалы – новые электроды для извлечения металлов из разбавленных растворов. 1. Нетканые углеродные волокнистые материалы. // Изв. СО АН СССР. Сер. хим. наук. – 1984. № 17, вып. 6. – С. 120-127.
13. Кошев А.Н., Варенцов В.К. Математическое и численное моделирование работы реактора с проточными трехмерными электродами в режиме предельного диффузионного тока в условиях нестационарности // Теоретические основы химической технологии. – 2018. Т. 52. № 5. – С. 497-503.
14. Жеребилов А.Ф., Варенцов В.К. Экспериментальное подтверждение наличия анодных зон на катоде из углеродных волокнистых материалов // Изв. СО АН СССР. Сер. хим. наук. – 1985. № 8. Вып. 3. – С. 35-39.
15. Варенцов В.К., Кошев А.Н. Теоретические и экспериментальные исследования образования анодных зон в объеме катодно поляризованного трехмерного электрода

из углеродного волокнистого материала // Теоретические основы технологической технологии. – 2022. Том 54. № 4. – С. 464-473.

16. Янилкин В.В. Роль материала электрода в электрохимии. Булгеровские сообщения. – 2021. Т. 65. № 2. – С. 63-86.

17. Graphite felt as a versatile electrode material: Properties, reaction environment, performance and applications. / L. Fabián, F.C. Walsh, J.L. Nava, C.P. de León // Electrochimica Acta. – 2017. – 258 p. DOI:10.1016/j.electacta.2017.11.165.

18. Review – Carbon Cloth as a Versatile Electrode: Manufacture, Properties, Reaction Environment, and Applications / M.I. León, L.F. Castañeda, A.A. Márquez, F.C. Walsh, J.L. Nava // Journal of the Electrochemical Society. – 2022. 169(5), 053503.

19. Catalytic graphitization of residual carbon from gasification fine slag with ferric chloride as catalyst / X. Zhao, K. Liu, F. Guo, Y. Zhang, J. Wu // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2022.

20. Mathematical modeling and simulation of electrochemical reactors: A critical review / F.F. Rivera, T. Pérez, L.F. Castañeda, J.L. Nava // Chemical Engineering Science. – 2021. Vol. 239, 116622. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.116622>.

21. Maslii A.L., Poddubnyi N.P., Medvedev A.Z. Distribution of geometrical current density inside a flow-by porous electrode: effect of electrode parameters and electrochemical reactions. // Russian Journal of Electrochemistry. – 2016. V. 52. №6. – Pp. 576-583.

*Статья поступила в редакцию 18.07.2022*

*Статья принята к публикации 16.09.2022*

УДК 004.855.5.

DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0004

## ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ КЛАССИФИКАЦИЕЙ ПОЖАРНЫХ ПО СТЕПЕНИ РИСКА ТРАВМИРОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ДЕРЕВА РЕШЕНИЙ

©Автор(ы) 2022

SPIN: 2838-2550

AuthorID:634849

ORCID: 0000-0002-7149-8489

**КУВАТОВ Валерий Ильич**, доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры системного анализа и антикризисного управления

*Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России  
(196105, г. Санкт-Петербург, Московский пр-кт, д. 149, e-mail: kyb.valery@yandex.ru)*

SPIN:3913-7751

AuthorID: 586844

ORCID: 0000-0002-2407-5061

**МОТОРЫГИН Юрий Дмитриевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры  
криминалистики и инженерно-технических экспертиз

*Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России  
(196105, г. Санкт-Петербург, Московский пр-кт, д. 149, e-mail: fire-risk@mail.ru)*

SPIN:1677-1402

AuthorID: 215116

ORCID: 0000-0003-1661-9089

**СМИРНОВ Алексей Сергеевич**, доктор технических наук, профессор, первый заместитель начальника

*Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России  
(196105, г. Санкт-Петербург, Московский пр-кт, д. 149, e-mail: sas\_112@mail.ru)*

**Аннотация.** Профессия пожарного – одна из самых опасных. Поэтому кандидат, поступающий на службу в пожарные части МЧС России, должен соответствовать определенным квалификационным требованиям. Эти требования изложены в руководящих документах МЧС России. Однако требований руководящих документов мало. В них нельзя предусмотреть все. Поэтому степень соответствия кандидата профессии пожарного должна уточняться по результатам компьютерного моделирования профессионально важных качеств. Между тем многие задачи компьютерного моделирования таких качеств относятся к классу слабо структурированных, трудно формализуемых, алгоритмически неразрешимых. Причина алгоритмической неразрешимости кроется в отсутствии математических методов, соответствующих сложности этих задач, в необходимости использовать для их решения большие по объемам и неструктурированные данные. Следствие алгоритмической неразрешимости – невозможность применения классических методов компьютерного моделирования для их решения. Налицо противоречие между требованиями компьютерного моделирования профессионально важных качеств пожарного и алгоритмической неразрешимостью многих из этих задач. Один из наиболее продуктивных путей разрешения данного противоречия связан с разработкой моделей этих задач на базе методов и технологий Data Mining. В настоящее время существует много статистики по травмам сотрудников пожарной охраны на пожарах, но не существует построенных на этой статистике и технологии Data Mining достоверных математических моделей оценки влияния профессионально важных качеств на предрасположенность к получению таких травм.

В данной статье рассмотрен метод управления классификацией пожарных по степени риска – отнесения пожарных с известными психологическими и соматотипическими качествами, известным состоянием здоровья к одному из двух классов: «травмоопасен» и «не травмоопасен». В основе метода лежит научно-методический аппарат деревьев решений технологии Data Mining.

**Ключевые слова:** большие данные, деревья решений, иерархии, классификация, машинное обучение, решающие правила, риск, управление, чрезвычайные ситуации, Data Mining.

## PRINCIPLES OF MANAGING THE CLASSIFICATION OF FIREMANS BY RISK OF INJURY WITH THE HELP OF A DECISION TREE

© The Author(s) 2022

**KUVATOV Valery Ilyich**, doctor of technical sciences, professor,  
professor of the Department of System Analysis and Crisis Management

**MOTORYGIN Yury Dmitrievich**, doctor of Technical sciences, professor,  
professor of the Department of Criminalistics and Engineering-Technical Expertise

**SMIRNOV Alexey Sergeevich**, doctor of technical sciences, professor, first deputy Chief  
*St. Petersburg University of the State Fire Service of the EMERCOM of Russia*

*(196105, St. Petersburg, Moskovsky Ave., 149, e-mails: kyb.valery@yandex.ru, fire-risk@mail.ru, sas\_112@mail.ru)*

**Abstract.** The profession of a firefighter is one of the most dangerous. Therefore, a candidate entering the service in

the fire departments of the Russian Emergencies Ministry must meet certain qualification requirements. These requirements are set out in the guidelines of the EMERCOM of Russia. However, the requirements of the governing documents are few. They cannot foresee everything. Therefore, the degree of compliance of the candidate with the profession of a firefighter should be clarified based on the results of computer modeling of professionally important qualities. Meanwhile, many problems of computer simulation of such qualities belong to the class of weakly structured, difficult to formalize, algorithmically unsolvable. The reason for algorithmic unsolvability lies in the lack of mathematical methods corresponding to the complexity of these problems, in the need to use large and unstructured data to solve them. The consequence of algorithmic undecidability is the impossibility of using classical computer modeling methods to solve them. There is a contradiction between the requirements of computer simulation of the professionally important qualities of a firefighter and the algorithmic unsolvability of many of these problems. One of the most productive ways to resolve this contradiction is associated with the development of models of these tasks based on the methods and technologies of Data Mining. Currently, there are many statistics on injuries to firefighters in fires, but there are no reliable mathematical models built on these statistics and Data Mining technology to assess the impact of professionally important qualities on the predisposition to such injuries. This article considers a method for managing the classification of firefighters according to the degree of risk - classifying firefighters with known psychological and somatotypical qualities, a known state of health, to one of two classes: "injurious" and "not traumatic". The method is based on the scientific and methodological apparatus of decision trees of Data Mining technology.

**Keywords:** big data, decision trees, hierarchies, classification, machine learning, decision rules, risk, management, emergencies, Data Mining.

*Для цитирования:* Куватов В.И. Принципы управления классификацией пожарных по степени риска травмирования с помощью дерева решений / В.И. Куватов, Ю.Д. Моторыгин, А.С. Смирнов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022. – Т. 11. – № 3(59). – С. 26-31. – DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0004.

**Введение.** Известно, что профессия пожарного одна из самых опасных. Эта профессия находится на первых позициях рейтинга опасности, как в России, так и в мире. Известно также, что риск получения пожарным травмы на пожаре во многом зависит от его психологических, соматотипических и ряда других качеств, от состояния здоровья. Поэтому при выборе кандидата на должность пожарного, помимо проверки соответствия квалификационным требованиям, целесообразно обследовать его на предмет этих качеств.

В настоящее время в МЧС России существует огромное количество статистики по травмам сотрудников пожарной охраны на пожарах. Но классические методы моделирования не позволяют в полной мере ее учитывать. Это связано с большим разнообразием факторов, многие из которых являются малозначимыми в отдельности, но совместно оказывающие значительное влияние на вероятность травмирования. Для полноценного учета этой статистики лучше подходит технология *Data mining* и машинное обучение.

В настоящее время проблеме отбора специалистов опасных профессий посвящены многочисленные научные исследования. Среди них исследования Аристархова В.А.[1], Балабанова А.А. [2,3], Р.С. Семикина [4], Овечкина Д.В. [5], Толочек А. [6], Шленкова А.В., Мальгиной Е.А., Москаленко Г.В. [7], Myers, Isabel Briggs, and McCaulley, Mary H [15], Keirse, David & Bates, Marilyn.[16] и др. В [1] разработан метод применения мобильных средств пожаротушения с учетом уровня профессиональной подготовки пожарных. В [2,3] – методы оценки кандидатов на предмет их профпригодности. В [4] – общие вопросы отбора кандидатов для службы в ГПС МЧС России. В [5] – подходы к подготовке

и расстановке кадров с учетом специфики МЧС. В [6] – исторические аспекты и перспективы постановки задач профессионального отбора. В [7] – влияние негативных факторов профессиональной деятельности на индивидуально-личностные особенности пожарных. В [15] – руководство по разработке и использованию психологических индикаторов. В [16] – типы характера и темперамента.

Математических методов, в которых с помощью технологии *Data Mining* [8] и машинного обучения [17, 20, 21] ставилась и решалась бы задача управления классификацией пожарных по степени риска травмирования в зависимости от психологических и соматотипических качеств, от состояния здоровья не выявлено. Анализ технологии *Data Mining* и машинного обучения показал, что для решения этой задачи целесообразно использовать деревья решений.

Анализу деревьев решений как одному из наиболее полезных методов классификации больших данных посвящены работы [8-14, 17-24]. В этих работах рассмотрены особенности различных алгоритмов классификации с помощью деревьев решений, учитывающих специфику предметной области. Однако работ, в которых в прямой постановке ставилась и решалась бы задача управления классификацией пожарных по степени риска травматизма с помощью деревьев решений, нет. Таким образом, задача разработки метода управления классификацией пожарных по степени риска травматизма является актуальной.

**Методология.** Цель настоящей статьи заключается в том, чтобы разработать основанный на технологии *Data Mining* метод управления отнесением пожарных с известными психологическими и соматотипическими качествами, с известным состоянием

здоровья к одному из двух классов: «травмоопасен» и «не травмоопасен».

Метод будем разрабатывать с помощью деревьев решений. Впервые деревья решений описаны в работах Ховленда (Hoveland) и Ханта (Hunt) в 50-х годах XX века. Интенсивное развитие метода началось с конца 60-х годов. В настоящее время деревья решений используются в медицине, в геологии, в военной разведке и пр. Это один из наиболее полезных инструментов извлечения знаний из данных. Деревья решений позволяют получить решение об отнесении объекта к определенному классу с помощью ответов на иерархически организованную систему вопросов. Вопрос, задаваемый на очередном уровне иерархии, зависит от ответа, полученного на предыдущем уровне.

Деревья решений представляют собой иерархические древовидные структуры, состоящие из корневой вершины, внутренних и концевых вершин – листьев. В корневой вершине и во внутренних вершинах находятся решающие правила типа «если ... – то ...». Листья указывают класс объекта.

Рассмотрим задачу классификации – задачу определения, к какому из  $n$  классов  $K_i$  относится классифицируемый объект. Дерево решений, по которому будет происходить классификация, строится по обучающей выборке  $S$ , состоящей из  $m$  объектов. Каждый объект характеризуется  $r$  атрибутами. Для каждого объекта обучающей выборки известно, к какому классу он относится (табл. 1). Отнесение объекта на этапе классификации к тому или иному классу производится по значениям его атрибутов.

Таблица 1 – Обучающая выборка

№ объекта	Атрибут 1	Атрибут 2	...	Атрибут n	Класс объекта
1	$X_{11}$	$X_{12}$	...	$X_{1r}$	Класс 1
...	...	...	...	...	...
m	$X_{m1}$	$X_{m2}$	...	$X_{mr}$	Класс n

Процесс обучения заключается в поиске оптимальных значений атрибутов для каждого класса. Поиск оптимальных значений производится в соответствии с требованием снижения индекса неоднородности в выборках, порождаемых искомым разбиением обучающей выборки. Этот индекс показывает, насколько различны объекты из разных классов. Существует несколько индексов неоднородности. Наиболее популярными из них являются: энтропийный индекс неоднородности, индекс Джини и индекс ошибочной классификации [13]. Остановимся на энтропийном индексе. Этот индекс рассчитывается по формуле

$$Inf(S) = -\sum_{i=1}^n P_i \log_2(P_i). \quad (1)$$

Здесь  $P_i$  – часть объектов класса  $i$  в обучающей выборке  $S$ . При этом принимается, что  $\log_2(0)=0$ . Из (1) следует, что максимальное значение  $Inf(S)$  получает при равенстве долей классов, а наименьшее – если все объекты относятся к одному классу.

Для оценки эффективности деления обучающей

выборки  $S$  на две непересекающиеся подвыборки  $S^1$  и  $S^2$  используем величину снижения среднего индекса неоднородности  $S^1$  и  $S^2$  по отношению к  $S$ ,

$$Gain(S) = Inf(S) - P_1 \cdot Inf(S^1) - P_2 \cdot Inf(S^2), \quad (2)$$

где  $P_1$  и  $P_2$  являются долями  $S^1$  и  $S^2$  в выборке  $S$ .

На первом этапе обучения ищется оптимальное разбиение для корневой вершины. Для этого строятся разбиения по каждому из  $r$  атрибутов обучающей выборки. Выбирается атрибут с наибольшим значением величины  $Gain$ . Подвыборки соответствующие этому атрибуту оцениваются с помощью показателя останки [14]. Если какая-то подвыборка  $S^*$  удовлетворяет критерию останки, соответствующая вершина дерева объявляется концевой и для неё назначается класс. В противном случае формируется новая внутренняя вершина, и процесс построения дерева продолжается. При этом вместо обучающей выборки  $S$  берется выборка  $S^*$ . Обучение продолжается, пока все вновь построенные вершины не окажутся концевыми (листьями).

При классификации на вход корневого узла подается новый объект, который необходимо отнести к одному из классов, полученных на этапе обучения. Этот объект, в зависимости от выбранного варианта ответа переходит к одной из вершин более низкого иерархического уровня. Процесс длится, пока объект не окажется в одном из листьев. В этом случае ему назначается класс, соответствующий наименованию этого листа.

**Результаты.** Пусть имеется тринадцать записей о результатах обследования группы сотрудников пожарной охраны на предмет психологических и соматотипических качеств, состояния здоровья, а также данные о травмах, полученных этими сотрудниками за заданный период времени, таблица 2. Эту таблицу мы будем использовать для построения дерева решений, с помощью которого затем будем определять, является ли новый сотрудник травмоопасным. Для построения будем использовать алгоритм  $ID3$  [13]. В качестве критерия останки обучения будем использовать критерий достижения полной однородности по одному из классов [14].

В таблице 6 записей относятся к классу травмоопасен (соответствующий сотрудник был травмирован в течение заданного интервала времени), а семь – к классу не травмоопасен (сотрудник не был травмирован в течение заданного интервала времени). Следовательно, энтропия записей будет равна:

$$Inf(S) = -\frac{6}{13} \log_2\left(\frac{6}{13}\right) - \frac{7}{13} \log_2\left(\frac{7}{13}\right) = 0.9957 \text{ бит.}$$

Оценим все три атрибута  $K_1$ ,  $K_2$  и  $K_3$  по формуле (2). Из таблицы 2 формируем таблицу 3 для атрибута  $K_1$ .

Из таблицы 3 найдем  $Gain(K_1)$ :

$$Inf(\text{Группа 1}) = -\frac{5}{5} \cdot \log_2\left(\frac{5}{5}\right) - \frac{0}{5} \cdot \log_2\left(\frac{0}{5}\right) = 0$$

$$Inf(\text{Группа 2}) = -\frac{2}{4} \cdot \log_2\left(\frac{2}{4}\right) - \frac{2}{4} \cdot \log_2\left(\frac{2}{4}\right) = 1$$

$$Inf(\text{Группа 3}) = -\frac{0}{4} \cdot \log_2\left(\frac{0}{4}\right) - \frac{4}{4} \cdot \log_2\left(\frac{4}{4}\right) = 0$$

Тогда:

$$\text{Inf}(K_1) = \frac{5}{13} \cdot 0 + \frac{4}{13} \cdot 1 + \frac{4}{13} \cdot 0 = 0.3077, \text{Gain}(K_1) = 0.9957 - 0.3077 = 0.688.$$

Таблица 2 – Обучающая выборка с результатами тестирования

№ сотрудника	$K_1$ (психологические резервы)	$K_2$ (соматотип)	$K_3$ (состояние здоровья)	Был травмирован
1	группа 1	экторморф	практически здоров	нет
2	группа 2	экторморф	здоров	нет
3	группа 1	мезоморф	практически здоров	нет
4	группа 3	экторморф	практически здоров	да
5	группа 3	эндоморф	практически здоров	да
6	группа 3	эндоморф	здоров	да
7	группа 1	экторморф	здоров	нет
8	группа 2	экторморф	здоров	нет
9	группа 2	эндоморф	практически здоров	да
10	группа 2	эндоморф	практически здоров	да
11	группа 1	экторморф	здоров	нет
12	группа 1	мезоморф	практически здоров	нет
13	группа 3	мезоморф	здоров	да

Таблица 3 – Сводные данные для атрибута  $K_1$

Атрибут $K_1$	Всего записей	Травмирован	Не травмирован
группа 1	5	0	5
группа 2	4	2	2
группа 3	4	4	0

Из таблицы 2 формируем таблицу 4 для атрибута  $K_2$ .

Таблица 4 – Сводные данные для атрибута  $K_2$

Атрибут $K_2$	Всего записей	Травмирован	Не травмирован
экторморф	6	1	5
мезоморф	3	1	2
эндоморф	4	4	0

Из таблицы 4 найдем  $\text{Gain}(K_2)$ :

$$\text{Inf}(\text{экторморф}) = -\frac{1}{6} \cdot \log_2\left(\frac{1}{6}\right) - \frac{5}{6} \cdot \log_2\left(\frac{5}{6}\right) = 0.650,$$

$$\text{Inf}(\text{мезоморф}) = -\frac{1}{3} \cdot \log_2\left(\frac{1}{3}\right) - \frac{2}{3} \cdot \log_2\left(\frac{2}{3}\right) = 0.9183,$$

$$\text{Inf}(\text{эндоморф}) = -\frac{4}{4} \cdot \log_2\left(\frac{4}{4}\right) - \frac{0}{4} \cdot \log_2\left(\frac{0}{4}\right) = 0.$$

Тогда:

$$\text{Inf}(K_2) = \frac{6}{13} \cdot 0.650 + \frac{3}{13} \cdot 0.9183 + \frac{4}{13} \cdot 0 = 0.5119,$$

$$\text{Gain}(K_2) = 0.9957 - 0.5119 = 0.4838.$$

Из таблицы 2 сформируем таблицу 5 для атрибута

$K_3$ .

Таблица 5 – Сводные данные для атрибута  $K_3$

Атрибут $K_3$	Всего записей	Травмирован	Не травмирован
здоров	6	2	4
практически здоров	7	4	3

Из таблицы 5 найдем  $\text{Gain}(K_3)$ :

$$\text{Inf}(\text{здоров}) = -\frac{2}{6} \cdot \log_2\left(\frac{2}{6}\right) - \frac{4}{6} \cdot \log_2\left(\frac{4}{6}\right) = 0.9183,$$

$$\text{Inf}(\text{практически здоров}) = -\frac{4}{7} \cdot \log_2\left(\frac{4}{7}\right) - \frac{3}{7} \cdot \log_2\left(\frac{3}{7}\right) = 0.9852,$$

Тогда:

$$\text{Inf}(K_3) = \frac{6}{13} \cdot 0.9183 + \frac{7}{13} \cdot 0.9852 = 0.9543,$$

$$\text{Gain}(K_3) = 0.9957 - 0.9543 = 0.0414.$$

Максимальное значение прироста информации будет для атрибута  $K_1$ . Поэтому, в корневой вершине поставим атрибут  $K_1$  (рис. 1). Из корневой вершины выходят три ветви: «Атрибут  $K_1$  → Группа 1», «Атрибут  $K_1$  → Группа 2» и «Атрибут  $K_1$  → Группа 3».

Вернемся к таблице 3. Из нее следует, что все пять записей ветви «Атрибут  $K_1$  → Группа 1» относятся к классу не травмированных сотрудников. Следовательно, эта ветвь заканчивается листом (классом) не травмирован. Все четыре записи ветви «Атрибут  $K_1$  → Группа 3» относятся к классу травмированных сотрудников. Следовательно, эта

ветвь заканчивается листом (классом) травмирован. Ветвь «Атрибут  $K_1$  → Группа 2», содержащая две записи о не травмированных и две – о травмированных сотрудниках. Следовательно, она требует дальнейшего ветвления. Для нее нужно определить какой атрибут лучше подходит для дальнейшего деления:  $K_2$  или  $K_3$ . Можно показать, что оба атрибута имеют одинаковое значение показателя  $\text{Gain}$  и мы можем выбрать любой из них. Выберем  $K_2$ . Сформируем для ветви «Атрибут  $K_1$  → Группа 2 → атрибут  $K_2$ » таблицу 6, удалив из таблицы 2 все записи, относящиеся к группам 1 и 3 атрибута  $K_1$ .

Таблица 6 – Сводная выборка для ветви «Атрибут  $K_1$  → Группа 2»

№ сотрудника	$K_1$ (психологические резервы)	$K_2$ (соматотип)	$K_3$ (состояние здоровья)	Травмирован
2	группа 2	экторморф	здоров	нет
8	группа 2	экторморф	здоров	нет
9	группа 2	эндоморф	практически здоров	да
10	группа 2	эндоморф	практически здоров	да

Из таблицы 6 формируем таблицу 7 для атрибута  $K_2$ .

Таблица 7 – Сводные данные для атрибута  $K_2$

Атрибут $K_2$	Всего записей	Травмирован	Не травмирован
эктоморф	2	0	2
эндоморф	2	2	0

Из таблицы 7 следует, что ветвь «Атрибут  $K_1$  → Группа 2 → атрибут  $K_2$  → эктоморф» заканчивается листом не травмирован, а ветвь «Атрибут  $K_1$  → Группа 2 → атрибут  $K_2$  → эндоморф» – листом травмирован. На этом построение дерева решений закончено. Атрибут  $K_3$  оказывается избыточным. Можно показать, что если бы мы выбрали для дальнейшего ветвления

атрибут  $K_3$ , то избыточным оказался бы атрибут  $K_2$ .

В таблице 2 нет записей с сочетаниями атрибутов  $K_1$  → группа 1 →  $K_2$  → эндоморф. Тому возможны две причины: таблица не полна; некоторые сочетания просто не могут существовать.

Итоговое дерево решений представлено на рисунке 1.

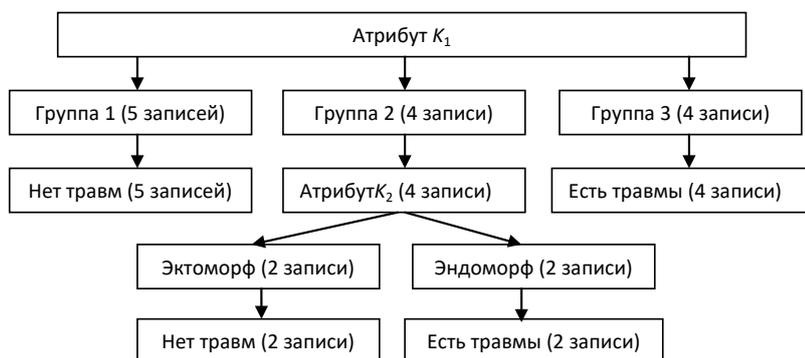


Рисунок 1 – Дерево решений

Теперь, используя дерево решений, мы можем проверить насколько травмоопасен претендент на должность пожарного и учесть этот показатель при приеме на работу наряду с квалификационными требованиями.

**Обсуждение.** В статье даны основы построения дерева решений и классификации пожарных на два класса: травмоопасен и нетравмоопасен с использованием этого дерева. Статья заканчивается примером построения дерева решений. Классификация нового объекта заключается в переходах от вершины к вершине дерева решений по правилу «если ..., то ...». Анализ примера показывает, что сложность классификации зависит, помимо прочего, от последовательности анализа профессионально важных качеств. В других исследованиях похожие задачи решались методами математической статистики, что требовало выдвижения и проверки гипотез о законах распределения профессионально важных качеств.

**Выводы.** В статье показана возможность и целесообразность применения деревьев решений для деления пожарных на два класса «травмоопасен» и «не травмоопасен». Пример, иллюстрирующий применение метода, содержит всего 13 записей, что обусловлено требованиями к объему статьи. Для реально работающей модели требуются много большие объемы данных.

В дальнейшем предполагается разработать аналогичный метод в российской аналитической платформе *Loginot* с использованием больших объемов

данных по делению сотрудников пожарной охраны на два класса: травмоопасен и нетравмоопасен, а затем обобщить его с учетом иных профессионально важных качеств.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Аристархов, В.А. Оценка готовности к применению мобильных средств пожаротушения: Материалы XXX международной научно-практической конференции «Системы безопасности – 2021» / В.П. Сорокоумов, В.А. Аристархов. – М. : Академия ГПС МЧС России, 2021. – С. 351-354.
2. Балобанов, А.А. Модель оценки кандидатов на вакантную должность в системе МЧС России / А.А. Балобанов, А.П. Корольков, А.И. Сапелкин // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». – 2019. – № 3. – С. 81-86.
3. Балобанов А.А. Методика отбора и оценки кандидатов для замещения вакантной должности в системе МЧС России на основе метода анализа иерархий / А.А. Балобанов, А.П. Корольков // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». – 2021. – № 2. – С. 71-77.
4. Семикин Р. А. Отбор кандидатов для службы в ГПС МЧС России / Р. А. Семикин // Интернет журнал «Технология техносферной безопасности (<http://ihb.mos.ru/ttb>) выпуск №5 (57). – 2014 г.
5. Овечкин Д. В. Современные подходы при подготовке и расстановке кадров в условиях специфики работы в системе МЧС России // Д. В. Овечкин. – Текст: непосредственный // Молодой ученый. 2018. – № 41 (227). – С. 135-137. – URL: <https://moluch.ru/archive/227/52879/>.
6. Толочек В. А. Профессиональный отбор: история и перспективы постановки задач / В. А. Толочек. // Известия Саратовского университета. Серия Акмеология образования. Психология развития. - 2018. – Т. 7. – Вып 2 (26). – С. 118-126.
7. Журавлев А.В. Организационные основы системы отбора кандидатов для обучения в образовательных

организациях высшего образования МЧС России / А.В. Журавлев. – Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2017. – № 35 (169). – С. 88-91.

8. Нечипорук Д.В. Особенности технологии Data Mining / Д.В. Нечипорук – Текст: непосредственный // Молодой исследователь Дона. – 2017. – № 1 (4) – 2017 г. <http://mid-journal.ru>.

9. Деревья решений, общие принципы. Loginom. <https://loginom.ru/Блог/decision-tree-p1>.

10. Кафтаников И.Л. Особенности применения деревьев решений в задачах классификации. / И.Л. Кафтаников, А.В. Парасич // Bulletin of the South Ural State University. Ser Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics. 2015. – vol 15. – no 3. – P. 26-32.

11. Деревья решений в задачах классификации: особенности применения и методы повышения качества классификации / Я.А. Полин, Т.В. Зудилова, И.В. Ананченко, Т.Е. Войтюк ; Журнал «Современные наукоемкие технологии». – 2020. – №9 – С. 59-63.

12. Некрасов М.В. Применение метода «дерево решений» при принятии инвестиционных решений /М.В. Некрасов // Журнал Экономика и управление в XXI веке: тенденции развития. – № 10. – 2013 г. – С. 171-175.

13. Сулейманова А.Н. Обзор алгоритмов развития деревьев решений / А.Н. Сулейманова ; Журнал Социология: методология, методы, математическое моделирование. – 2020. – Т. 0. – № 50-51. – С. 64-97.

14. Сенько О.В. Цифровые методы диагностики и прогнозирования процессов: учебное пособие / Сенько О.В. – Москва: Издательский Дом МИСиС, 2016. – 85 с. – URL: <http://www.iprbookshop.ru/107008.html>. - ISBN 978-5-906846-21-1: Б. ц. – Текст : электронный.

15. Myers, Isabel Briggs, and McCaulley, Mary H. Manual: A Guide to the Development and Use of the Myers-Briggs Type Indicator. Palo Alto, Calif.: Consulting Psychologists Press, 1985.

16. Keisey, David & Bates, Marilyn. Please Understand Me. Character and Temperament Types. Gnoseology Books Ltd., 1984.

17. Quinlan J.R. Induction of decision trees // Machine Learning. – 1986. – Vol.1. – No. 1. – P.81-106.

18. George H. Estimating Continuous Distributions in Bayesian Classifiers / H. George, P. Langley // Proceedings of the Eleventh Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence. San Mateo: Morgan Kaufmann. – 1995. – P. 338-345.

19. Payne H. J., Meisel W. S. An algorithm for constructing optimal binary decision trees // IEEE Transactions on Computers. – 1977. – Vol. 26. – No. 9. – P. 905916.

20. Freund Y. The alternating decision tree learning algorithm /Y. Freund, L. Mason// Proceeding of the Sixteenth.

21. Dreiman L. Random Forests. Machine Learning. 2001, Vol 45(1), pp 5-32. DOI: 10.1023/A:1010933404324

22. Anyanwu M., Shiva S. Comparative analysis of serial decision tree classification algorithms // International Journal of Computer Science and Security. – 2009. – Vol. 3, no. 3. – P. 230-240.

23. Genrikhov I. E. Synthesis and analysis of recognizing procedures on the basis of full decision trees // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2011. – Vol. 21, no. 1. – P. 45-51.

24. Loh W. Y., Kim H. Classification trees with bivariate linear discriminant node models // Computational and Graphical Statistics. – 2003. – Vol. 12, no. 3. – P. 512-530.

*Статья поступила в редакцию 07.06.2022*

*Статья принята к публикации 16.09.2022*

УДК 001.51

DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0005

## СИНТЕЗ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ РЕГИОНА

© Автор(ы) 2022

SPIN: 1480-2859

AuthorID: 818734

ORCID: 0000-0001-7603-9786

ResearcherID: ABI-4436-2020

ScopusID: 6601936733

**БУРЛОВ Вячеслав Георгиевич**, доктор технических наук,  
профессор Высшей школы техносферной безопасности

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*

*(195251, Россия, Санкт-Петербург, улица Политехническая, 29, e-mail: burlovvg@mail.ru)*

SPIN: 4537-1183

AuthorID: 1048304

ORCID: 0000-0003-2722-5552

ResearcherID: AAE-1582-2019

ScopusID: 57212553296

**ПОЛЮХОВИЧ Максим Алексеевич**, аспирант

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*

*(195251, Россия, Санкт-Петербург, улица Политехническая, 29, e-mail: polyuhovich\_ma@spbstu.ru)*

**Аннотация.** В связи с увеличением энергоемкости практически всех сфер жизнедеятельности человека вопрос об обеспечении безопасности электроснабжения становится все более первостепенным. Основная особенность передачи электроэнергии в условиях РФ заключается в значительном расстоянии от её источника до конечного потребителя. На протяжении всего участка линии электропередачи на элементы электроэнергетической сети воздействует огромное количество совершенно разнородных по своей природе факторов, среди которых выделяются гидрометеорологические факторы, особенно значимые ввиду территориального расположения и размеров России. Становится очевидным, что необходимо разработать систему, позволяющую своевременно реагировать на угрозы нарушения электроснабжения и устранять их. Среди известных методов системотехники наиболее подходящим для данных целей является подход на основе синтеза, главное достоинство которого заключается в возможности изначально заложить требуемый показатель эффективности системы, что в условиях неопределенности позволит достигать требуемой цели деятельности. В ходе проведенного исследования был осуществлен синтез системы обеспечения безопасности электроснабжения региона (СОБЭР) на основе системообразующего фактора – модели решения человека. СОБЭР включает три составляющие: электроэнергетическая система, геоинформационная система и система принятия решений, каждая из которых дает возможность получить характеристики процесса, позволяющие определить показатель эффективности системы или, наоборот, задать этот показатель на основе решения обратной задачи.

**Ключевые слова:** бесперебойное электроснабжение, системообразующий фактор, принятие решения, модель решения человека, геоинформационная система, электроэнергетическая система, системотехника, подход на основе синтеза, географические пространственные данные, показатель эффективности системы.

## SYNTHESIS OF THE ELECTRIC POWER SUPPLY SAFETY ENSURING SYSTEM OF A REGION

© The Author(s) 2022

**BURLOV Vyacheslav Georgievich**, doctor of technical sciences, professor of Higher School of Technosphere Safety

**POLYUKHOVICH Maxim Alekseevich**, post-graduate student

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

*(195251, Russia, St. Petersburg, street Polytechnicheskaya, 29, e-mails: burlovvg@mail.ru, polyuhovich\_ma@spbstu.ru)*

**Abstract.** Due to the increase in the energy intensity of almost all spheres of human activity, the issue of ensuring the safety of electricity supply is becoming more and more paramount. The main feature of the transmission of electricity in the conditions of the Russian Federation is a significant distance from its source to the end consumer. Throughout the entire section of the transmission line, the elements of the electric power network are affected by a huge number of factors that are completely heterogeneous in nature, among which hydrometeorological factors stand out, which are especially significant due to the territorial location and size of Russia. It becomes obvious that it is necessary to develop a system that allows you to respond in a timely manner to electric power failure threats and eliminate them. Among the known systems engineering methods, the most suitable for these purposes is the synthesis-based approach, the main advantage of which is the ability to initially set the required system performance indicator, which, under conditions of uncertainty, will allow achieving the required activity goal. In the course of the study, a synthesis of the electric power supply safety ensuring system of a region (EPSSER) was carried out on the basis of a system-forming factor - a model of human de-

cision. EPSSSR includes three components: an electric power system, a geoinformation system and a decision-making system, each of which makes it possible to obtain process characteristics that allow determining the system performance indicator or, conversely, to set this indicator based on solving the inverse problem.

**Keywords:** uninterrupted power supply, system-forming factor, decision making, human decision model, geographic information system, electric power system, system engineering, synthesis-based approach, geographic spatial data, system performance indicator.

*Для цитирования:* Бурлов В.Г. Синтез системы обеспечения безопасности электроснабжения региона / В.Г. Бурлов, М.А. Полюхович // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022. – Т. 11. – № 3(59). – С. 32-38. – DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0005.

**Введение.** В настоящее время, как отмечается многими исследователями [1-7], все масштабнее становится проблема обеспечения стабильного и качественного электроснабжения потребителей, которые варьируются от небольших населенных пунктов до градообразующих промышленных предприятий, что является актуальной задачей, стоящей перед руководством государства. В связи с особенностями как электроэнергетической системы (например, передача электроэнергии посредством воздушных линий электропередачи (ВЛЭП)), так и климатических и территориальных условий такой страны как Россия [8-10], вопросы разработки системы, гарантирующей бесперебойное электроснабжение, остаются актуальными до сих пор [11-14]. Статистические данные по аварийности в электроэнергетической системе [15, 16] ясно демонстрируют, что, несмотря на научно-технический прогресс во многих отраслях промышленности, подверженность состояния процесса передачи электроэнергии различным факторам не решена [17, 18]. Безусловно, среди всего комплекса факторов, значительнее остальных оказывающих влияние на количество и продолжительность перебоев в электроснабжении отдельной группой выделяются гидрометеорологические факторы [19-21], из которых можно назвать температуру окружающей среды, влажность, скорость ветра и т.д.

Учитывая вышесказанное, становится очевидным, что для предотвращения нарушения электроснабжения объектов необходимо разработать систему обеспечения безопасности электроснабжения региона (СОБЭР). В Постановление Правительства РФ от 16 февраля 2008 года № 86 [22] заложены положения о создании и функционировании штабов по обеспечению безопасности электроснабжения. Под «безопасностью электроснабжения» в данной работе понимается состояние процесса передачи электроэнергии посредством ВЛЭП, которое характеризуется вероятностью нарушения электроснабжения либо близкой к нулю, либо равной заранее установленному допустимому значению.

Объекты, составляющие окружающий мир, существуют в пространственно-временных координатах. Поэтому для обеспечения их безопасности необходимо разработать подход, который позволит формировать свойства множества требуемых пространственно-временных состояний системы,

обеспечивающей своевременное прогнозирование и предотвращение угрозы нарушения функционирования объекта на всех этапах его существования. Наиболее подверженным воздействию различных факторов окружающей среды элементом электроэнергетической отрасли являются ВЛЭП [2, 4-6]. Основная трудность, возникающая при обеспечении безопасности подобных территориально распределенных объектов, заключается в постоянной изменчивости климатических параметров обстановки.

Проблемы электроснабжения потребителей в условиях деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов окружающей среды вынуждают искать решение в применении современных технологий [6], которые способствуют принятию решений, обеспечивающих комплексную политику по управлению безопасностью электроснабжения. Однако такой подход, который обеспечивал бы взаимодействие передовых технологий с системой принятия решений при возникновении угроз нарушения электроснабжения, пока достаточно не проработан [23].

Из постановки вопроса об обеспечении безопасности электроснабжения в условиях деструктивного воздействия гидрометеорологических факторов, вытекает задача прогнозирования гидрометеорологических факторов. Изменчивость характеристик процессов окружающей среды требует постоянного контроля и наблюдения, что уже предполагает использование автоматизированной информационной системы для обработки пространственно-временных данных, основой интеграции которых должна служить географическая информация. Необходимость моделирования поведения системы и ее компонентов требует выбора инструментов представления. В настоящее время в области обеспечения безопасности широко используются преимущества веб-технологий, искусственного интеллекта, интеллектуального анализа данных, параллельной обработки в реальном времени, геоинформационной системы (ГИС), дистанционного зондирования, мобильной и спутниковой связи [24-28]. Основываясь на научных исследованиях и передовой практике, реализуемой в настоящее время, ГИС признана научным сообществом как наиболее подходящий инструмент для сбора и преобразования географических пространственных данных [29], а также как инструмент для геопространственной

визуализации полученных результатов [30]. Геопространственное представление результатов используется как при принятии решений в реальных ситуациях [31], так и в пределах теоретических методов научного познания [32]. В рамках данного исследования наибольший интерес представляют географические пространственные данные, полученные при помощи ГИС.

*Цель* исследования – на основе системообразующего фактора осуществить синтез СОБЭР. Предполагается, что полученный результат внесет значительный научный вклад в развитие основ обеспечения безопасности электроснабжения.

**Методология.** В основе любой деятельности, которая осуществляется в трех системах (социальная, экономическая и технико-технологическая) лежит решение человека (академик АН СССР Моисеев Н.Н., 1981). Для поиска выхода из возникающих перед ним ситуаций человеку необходимо работать с тремя категориями: система, модель и предназначение (академик АМН СССР и АН СССР Анохин П.К., 1979). Таким образом, с целью гарантированного достижения цели деятельности, в данном случае обеспечения безопасности электроснабжения, нужно устранить две проблемы методологического уровня.

*Первая проблема.* В системотехнике для разработки системы применяют два подхода (Г. Гуд, Р. Макол, 1957):

- подход на основе анализа (характеризуется простым перебором вариантов);
- подход на основе синтеза (необходимо знать закон построения и функционирования системы).

На практике наиболее распространен первый подход, но при его применении не всегда удается достичь поставленных целей [33, 34]. Поэтому для разработки СОБЭР рекомендуется применять второй подход, который основан на синтезе. В качестве инструмента, позволяющего осуществить данную идею, можно рассмотреть закон сохранения целостности объекта (ЗСЦО) [35], который на протяжении нескольких лет активно прорабатывается научно-педагогической школой «Системная интеграция процессов государственного управления», зарегистрированной в реестре научно-педагогических школ (г. Санкт-Петербург [36]).

*Вторая проблема.* Человек как лицо, принимающее решение (ЛПР) решает задачи на основе модели (Майкл А. Арбиб, 1964; академик АМН СССР и АН СССР Анохин П.К., 1979). Очевидно, что возникает необходимость синтезировать адекватные сложившейся обстановке модели [37]. Адекватность модели может быть оценена путем применения трех подходов [38, 39]: проверка на практике, сравнение с эталоном, полнота учета основных закономерностей предметной области. Для решения поставленной в данном исследовании задачи целесообразно использовать третий подход, но здесь возникает сложность в поиске закона, позволяющего учитывать основные закономерности рассматриваемого про-

цесса. Предлагается использовать ЗСЦО.

Из вышесказанного следует, что для ЛПР необходимо иметь условие существования процесса электроснабжения региона. И, если передача электроэнергии осуществляется, то можно говорить о том, что обеспечивается безопасность электроснабжения. При этом согласно ЗСЦО решение должно быть получено на основе системной интеграции свойств мышления человека, свойств объектов окружающего мира и всеобщей связи явлений. Так как ЛПР осуществляет свою деятельность на основе модели, то, чтобы деятельность, осуществляемая человеком, соответствовала сложившейся обстановке, требуется иметь математическую модель решения ЛПР. Аналогичная ситуация характерна и для случая разработки системы: необходимо располагать критерием правильно построенной системы.

Системы обеспечения безопасности довольно чувствительны к принятию определенного решения, так как от этого решения зависит то, в каком состоянии будет находиться система. Очевидно, что для создания рационально организованной системы необходимо иметь математическую модель решения ЛПР. В исследовании [40] она уже была получена авторами в виде показателя эффективности системы управления электроснабжением.

Принятое определение понятия «решение» как выбора альтернатив страдает концептуальной неполнотой (Дружинин В.В., Конторов Д.С.). Согласно Анохину П.К. для получения результатов, гарантирующих достижение цели деятельности, необходимо иметь системообразующий фактор (СОФ). В технико-технологических системах СОФ является моделью решения человека. Получить СОФ позволяет применение ЗСЦО. При наличии СОФ решение основано на выборе упорядоченных СОФ альтернатив, и, напротив, при его отсутствии принятие решения осложнено в виду многообразия выбора и беспорядочности альтернатив.

**Результаты.** В исследовании [40] был получен граф состояния системы обеспечения безопасности электрических сетей с учетом квалификации руководителя. Данные результаты можно использовать для подхода на основе синтеза с целью разработки СОБЭР. Так как в данном исследовании основной интерес представляет безопасность электроснабжения именно региона, то в качестве основного руководящего органа будет рассматриваться штаб по обеспечению безопасности электроснабжения (своего рода ЛПР). Очевидно, что штаб по обеспечению безопасности электроснабжения в процессе своей деятельности реализует два процесса: идентифицирует или нейтрализует угрозу нарушения электроснабжения.

Таким образом, состояния графа [40] описываются следующим образом (рис. 1): состояние «1» – штаб по обеспечению безопасности электроснабжения не идентифицирует и не нейтрализует угрозу нарушения электроснабжения; состояние «3» – штаб по обеспечению безопасности электроснабжения

идентифицирует и не нейтрализует угрозу нарушения электроснабжения; состояние «4» – штаб по обеспечению безопасности электроснабжения не идентифицирует и нейтрализует угрозу нарушения электроснабжения; состояние «2» – штаб по обеспечению безопасности электроснабжения идентифицирует и нейтрализует угрозу нарушения электроснабжения. Переходы между состояниями характеризуются определенными переменными, оперируя которыми можно достичь требуемой цели деятельности (обеспечить безопасность электроснабжения):  $\Delta T$  – среднее время выполнения целевой задачи (электроснабжение потребителей);  $\Delta T_{CP}$  – среднее время срыва целевой задачи (среднее время перерыва в электроснабжении потребителей);  $\Delta t_{PY}$  – среднее время появления угрозы нарушения электроснабжения;  $\Delta t_{IY}$  – среднее время идентификации угрозы нарушения электроснабжения;  $\Delta t_{NY}$  – среднее время нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения;  $\Delta t_{CP}$  – среднее время ошибочного выполнения действий по устранению угрозы нарушения электроснабжения штабом по обеспечению безопасности электроснабжения по причине невозможности распознать ситуацию (показатель квалификации руководителя).

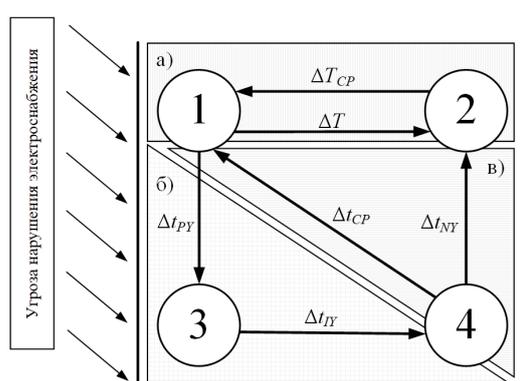


Рисунок 1 – СОБЭР (компоненты:  
а) электроэнергетическая система;  
б) геоинформационная система; в) система принятия решений) (составлено авторами)

Наибольший интерес в рамках данного исследования представляет собой состояние «2», так как в этом случае все угрозы нарушения электроснабжения, возникающие в контуре СОБЭР, идентифицированы и нейтрализованы, то есть объекты электроэнергетической системы выполняют свое предназначение – стабильное электроснабжение потребителей. В рамках принятой терминологии вероятность нахождения СОБЭР в состоянии «2» – требуемый показатель эффективности системы обеспечения безопасности, что и является необходимым условием существования процесса электроснабжения региона, то есть это СОФ.

Учитывая, что рассматривается поток событий, аналогичный потоку Пуассона, и, применяя систему дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена, можно определить вероятность нахождения СОБЭР в

каждом из четырех состояний. Таким образом, СОФ СОБЭР может быть представлен в следующем виде:

$$P_2 = \frac{a + b + c}{d + e + f + a + g + b + c + h} \quad (1)$$

где  $a = \Delta T \cdot \Delta t_{CP} \cdot \Delta t_{IY}$ ;  $b = \Delta T \cdot \Delta t_{NY} \cdot \Delta t_{IY}$ ;  $c = \Delta t_{PY} \cdot \Delta t_{NY} \cdot \Delta t_{IY}$ ;  $d = \Delta t_{PY} \cdot \Delta T_{CP} \cdot \Delta t_{CP}$ ;  $e = \Delta t_{PY} \cdot \Delta T_{CP} \cdot \Delta t_{NY}$ ;  $f = \Delta t_{PY} \cdot \Delta T_{CP} \cdot \Delta t_{IY}$ ;  $g = \Delta T_{CP} \cdot \Delta t_{CP} \cdot \Delta t_{IY}$ ;  $h = \Delta T_{CP} \cdot \Delta t_{NY} \cdot \Delta t_{IY}$ .

Используя СОФ и подход на основе синтеза, СОБЭР представлена в виде, показанном на рисунке 1. Одним из главных преимуществ подхода на основе синтеза является то, что разработчик системы может заранее определить свойства, характеристики и условия использования системы, при которой эффективность этой системы будет оптимальной (требуемой или максимальной) в смысле выбранного критерия.

Значения показателей  $\Delta T$ ,  $\Delta T_{CP}$  задаются в СОБЭР, они зависят от характеристик самой электроэнергетической системы (задаются требованиями к электроснабжению потребителей). Значения показателей  $\Delta t_{PY}$  и  $\Delta t_{IY}$  поступают из блока обработки географических пространственных данных ГИС. При этом  $\Delta t_{PY}$  зависит от гидрометеорологических условий на рассматриваемой территории в конкретный промежуток времени, в то время как  $\Delta t_{IY}$  фактически задается штабом по обеспечению безопасности электроснабжения (для достижения необходимого показателя эффективности СОБЭР). Показатели  $\Delta t_{NY}$  и  $\Delta t_{CP}$  обусловлены параметрами системы принятия решений, так как полностью зависят от штаба по обеспечению безопасности электроснабжения и электротехнического персонала. Показатель  $\Delta t_{CP}$  задается исходя из опыта и квалификации членов штаба по обеспечению безопасности электроснабжения.

В контексте СОБЭР взаимодействие между компонентами (электротехническая система, геоинформационная система, система принятия решений) требует единой модели, которая объединит основные структурные элементы, чтобы обеспечить адекватное формирование процесса принятия решений (рис. 2). Интеграция ГИС и электроэнергетической системы позволяет автоматически оценивать ситуацию на определенной территории и принимать необходимые меры по устранению возможной угрозы нарушения электроснабжения. Синтез всех трех компонентов в виде единой СОБЭР позволяет оптимизировать и упростить процессы принятия решений и повысить их эффективность. Анализируя данные, полученные при помощи ГИС, и проецируя результаты на регион электроснабжения с привязкой к объектам электроэнергетической системы, можно, используя такие составляющие системы принятия решений как декларативное знание (требования стандартов, руководящие документы), знание технологического процесса (программа поиска неисправностей, аналитический метод), стратегическое знание (надежность элементов, суррогатная модель), идентифицировать возможную угрозу нарушения электроснабжения и принять своевременные предупреждающие меры.

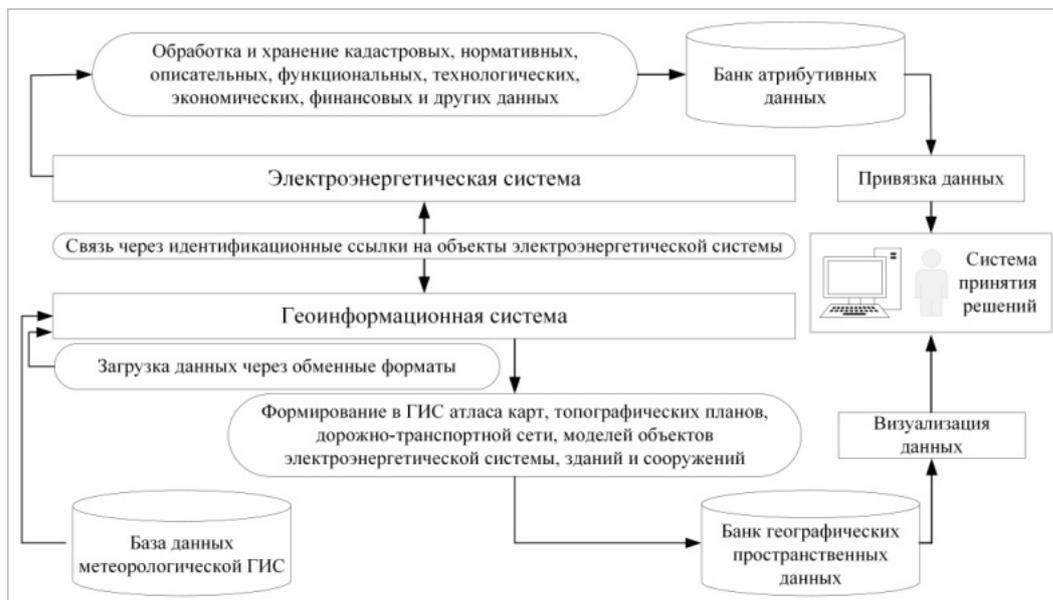


Рисунок 2 – Структурное взаимодействие компонентов СОБЭР (составлено авторами)

**Обсуждение.** Обеспечение безопасности электроснабжения является довольно трудной задачей [3, 5, 6, 23]. На данный момент все известные системы обеспечения безопасности проектируются с использованием подхода на основе анализа [24]. Главный недостаток такого подхода заключается в оценке результата функционирования системы при заданных ее свойствах и условиях применения. При этом вычисляются и анализируются показатели эффективности. То есть в данном случае ЛПП изначально не состоянием заложить в систему требуемый показатель эффективности, и ему приходится полагаться на то, что предпринимаемые действия позволят достичь желаемого эффекта [8, 10]. Например, при обледенении ВЛЭП одним из ключевых действий может являться профилактический подогрев проводов (до образования гололедно-изморозевых отложений) или плавка гололеда (после образования гололедно-изморозевых отложений). По сигналам датчиков, установленных на ВЛЭП, через время, требующееся на образование толщины гололедной муфты, превышающей допустимое значение, плюс время, необходимое на распознавание обстановки, ЛПП фиксирует необходимость начать действия по устранению угрозы нарушения электроснабжения. В данной ситуации время появления, идентификации и нейтрализации угрозы может меняться в неопределенном диапазоне, из-за чего вероятность того, что угроза нарушения электроснабжения идентифицирована и нейтрализована, может приближаться к нулю.

Подход на основе синтеза является наиболее предпочтительным для систем обеспечения безопасности, так как в данном случае ЛПП заранее имеет представление, какие действия он должен предпринять, чтобы достичь поставленной цели. Например, согласно (1), устанавливая показатель эффективности СОБЭР P2, ЛПП определяет допус-

тимое среднее время идентификации угрозы нарушения электроснабжения (заранее определяя способ мониторинга обстановки – использовать показания датчиков на ВЛЭП или осуществить осмотр при помощи беспилотных летательных аппаратов), и в случае возникновения реальной угрозы он может гарантировать, что безопасность электроснабжения будет обеспечена. Предложенная в рамках данного исследования СОБЭР обладает рядом преимуществ, среди которых возможность оперировать средними временами идентификации и нейтрализации угрозы нарушения электроснабжения и задавать необходимый показатель эффективности системы.

Несомненно, что упреждающее снижение вероятности перебоев в электроснабжении является предпочтительным и гораздо более эффективным во всех аспектах, исключают необходимость в привлечении аварийных служб для оперативного реагирования и восстановления объектов электроэнергетической системы. Следовательно, стратегии планирования и предотвращения срыва процесса передачи электроэнергии должны включать краткосрочный, среднесрочный и долгосрочный мониторинг и оценку вариаций такого срыва. Для определения требуемого уровня обеспечения безопасности электроснабжения региона должны определяться и исследоваться определенные критерии: экономические (перебои в функционировании объектов электроэнергетики и потери их производительности, повреждение имущества критически важной инфраструктуры, прекращение электроснабжения социально значимых объектов (общественные здания, школы, больницы), сетей связи и т.п.), социальные (гибель и ранение людей при нахождении вблизи поврежденного участка воздушной линии электропередачи, потребность людей в краткосрочной или долгосрочной помощи после прекращения электроснабжения), воздействие

на окружающую среду (гибель и ранение животных, пожар), и другие (политические последствия, потеря доверия к местным властям и т.д.). Кроме того, СОБЭР для снижения вероятности возникновения угрозы нарушения электроснабжения должна включать методологию мониторинга и оценки эффективности различных предпринятых мер с использованием показателей эффективности решений, таких как прямые потери, косвенные затраты, затраты на реализацию предупреждающих мер и другие возможные косвенные выгоды, отрицательные и (или) положительные побочные эффекты.

**Выводы.** Результатом проведенного исследования является структура СОБЭР, в основу которой был положен СОФ (модель решения человека). Принятие решения как выбор упорядоченных СОФ альтернатив позволяет гарантировать бесперебойное электроснабжение региона в условиях воздействия различных факторов окружающей среды, в том числе гидрометеорологических. Предложенный подход на основе синтеза для разработки систем обеспечения безопасности гарантирует достижение цели деятельности.

В дальнейших исследованиях предполагается раскрыть более подробно взаимосвязи между компонентами СОБЭР.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Седнев, В.А. Пути повышения надёжности электроснабжения сельских потребителей / В.А. Седнев // Пожары и ЧС. – 2018. – №1. – С. 58-62.
2. Воскобоев, В.Ф. Об устойчивом функционировании объекта электроснабжения в условиях чрезвычайных ситуаций / В.Ф. Воскобоев, А.Ю. Лебедев // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2019. – №4 (43). – С. 106-111.
3. Колесников, Д.Г. Единое управление электроэнергетической отраслью – условие устойчивой работы энергосистем и надежного электроснабжения потребителей / Д.Г. Колесников // Вестник Адлгейского государственного университета. Серия 5: Экономика. – 2018. – №1 (215). – С. 54-60.
4. Антонов, Ю.М. Методологические аспекты развития систем децентрализованного электроснабжения сельских потребителей, в том числе животноводческих объектов / Ю.М. Антонов // Техника и технологии в животноводстве. – 2017. – №3 (27). – С. 65-68.
5. Белов, О.А. Состояние электроэнергетики Камчатского края и перспективы ее развития / О.А. Белов // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. – 2021. – №4. – С. 48-56.
6. Karpachevskiy, A.M. GIS-analysis of the Ural power grid vulnerability to the impact of sleet and wind / A.M. Karpachevskiy, O.G. Filippova, P.E. Kargashin // Geography, Environment, Sustainability. – 2022. – №15(1). – P. 14-25.
7. Gubanov, M.M. Assessment of rational options for energy supply to remote consumers of the Arctic zone in the context of the development of renewable energy / M.M. Gubanov, V.V. Potemkin, D.E. Morkovkin, S.V. Shmanev // Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – № 723(5). – P. 052042.
8. Будникова, И.К. Компьютерное моделирование показателей надежности систем электроснабжения / И.К. Будникова, Е.В. Приймак // Вестник Казанского технологического университета. – 2017. – №5. – С. 76-79.
9. Степанов, В.М. Структура системы неразрушающего контроля параметров высоковольтных ЛЭП / В.М. Степанов, С.В. Ершов, В.Ю. Непомнящий, А.О. Шарлай // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2021. – №12. – С. 16-20.
10. Чернов, О.И. Современное состояние электрических сетей России и перспективы развития / О.И. Чернов, Е.А. Елисеева // Academy. – 2021. – №7 (70). – С. 20-22.
11. Шпиганович, А.Н. Провалы напряжения в системах электроснабжения / А.Н. Шпиганович, А.А. Шпиганович, И.И. Богомолов // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2018. – №12. – С. 7-12.
12. Туйчиев, З.З. Проблемы качества электроэнергии в системах электроснабжения / З.З. Туйчиев, И.К. Исмоилов, Д.А. Турсунов, Б.Б. Бойназаров // Проблемы науки. – 2019. – №10 (46). – С. 15-18.
13. Луковенко, А.С. Методы расчета надежности системы электроснабжения / А.С. Луковенко, И.В. Зеньков // Вестник ИрГТУ. – 2021. – №1 (156). – С. 57-65.
14. Кирпичникова, И.М. Обеспечение бесперебойного электроснабжения высокотехнологичных предприятий / И.М. Кирпичникова, С.С. Шипилов // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. – 2022. – №1. – С. 55-61.
15. Тряпицын, А.Б. Анализ аварийности и травматизма в электроэнергетике Российской Федерации / А.Б. Тряпицын, И.М. Кирпичникова, В.Ф. Бухтояров, Г.А. Круглов // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. – 2018. – №4. – С. 30-40.
16. Саликова, Н.С. Статистика аварий и отказов в электрических сетях Егиндыкольской районной электросети / Н.С. Саликова, О.В. Савин // НИР/S&R. – 2020. – №3. – С. 48-51.
17. Raza, M.A. Holistic and scientific approach to the development of sustainable energy policy framework for energy security in Pakistan / M.A. Raza, K.L. Khatri, M.I. Ul Haque, M. Shahid, K. Rafique, T.A. Waseer // Energy Reports. – 2022. – №8. – P. 4282-4302.
18. Ahmad, T. Energetics systems and artificial intelligence: Applications of industry 4.0 / T. Ahmad, H. Zhu, D. Zhang, R. Tariq, A. Bassam, F. Ullah, S.S. Alshamrani // Energy Reports. – 2022. – №8. – P. 334-361.
19. Козлов, А.В. Анализ аварийности сельских электрических сетей 0,38 кВ в ООО «АКС» «АМУРЭЛЕКТРОСЕТЬСЕРВИС» / А.В. Козлов, И.С. Шевцов // Инновационная наука. – 2021. – №7. – С. 50-54.
20. Грабчак, Е.П. Надежное электроснабжение – это приоритет для всех энергетиков / Е.П. Грабчак // ЭП. – 2021. – №7 (161). – С. 4-9.
21. Сбитнев, Е.А. Анализ аварийности сельских электрических сетей 0,38 кв нижегородской энергосистемы / Е.А. Сбитнев, М.С. Жукин // Вестник НГИЭИ. – 2020. – №11 (114). – С. 36-47.
22. Постановление Правительства РФ от 16.02.2008 № 86 (ред. от 30.04.2022) «О штабах по обеспечению безопасности электроснабжения».
23. Антропова, В.Р. Разработка вероятностной модели кратковременных нарушений электроснабжения / В.Р. Антропова, И.С. Сухачев, В.В. Сушков, А.С. Мартыанов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2021. – №2. – С. 76-85.
24. Ширшов, В.Д. Современные технологии безопасности жизнедеятельности / В.Д. Ширшов // Sciences of Europe. – 2019. – №36-3 (36). – С. 48-51.
25. Oubennaceur, K. Flood risk communication using ArcGIS StoryMaps / K. Oubennaceur, K. Chokmani, A.E. Alem, Y. Gauthier // Hydrology. – №20218(4).
26. Hawash, E. Change detection and urban expansion of Port Sudan, Red Sea, using remote sensing and GIS / E. Hawash, A. El-Hassanin, W. Amer, A. El-Nahry, H. Effat // Environmental Monitoring and Assessment. – 2021. – №193(11).
27. Chukwuma, E.C. A GIS based flood vulnerability modeling of Anambra State using an integrated Ivfn-Dematel-Anp Model / E.C. Chukwuma, C.C. Okonkwo, J.O. Ojediran, D.C. Anizoba, J.I. Ubah, C.P. Nwachukwu // Heliyon. – 2021. – №7(9).
28. Li, D. A city monitoring system based on real-time communication interaction module and intelligent visual information collection system / D. Li, B. Qin, W. Liu, L. Deng // Neural Processing Letters. – 2021. – №53(4). – P. 2501-2517.
29. Urquizo, J.A. A structured data flow system for photogrammetric mapping: the foundation of a citywide Cadastral works / J.A. Urquizo, C. Mugnier // Paper presented at the ACM International Conference Proceeding Series. – 2020. – Part F168981. – P. 108-116.
30. Мыслыва, Т.Н. Использование функциональных возможностей ГИС и данных дистанционного зондирования для мониторинга и картографирования мелиорированных земель / Т.Н. Мыслыва, Ю.Н. Дуброва, А.С. Кукреш, Т.Н.

Ткачева, Д.М. Лейко // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2022. – №1. – С. 176-183.

31. Медведенко, С.А. Визуальный анализ данных пассажиропотока железнодорожного транспорта / С.А. Медведенко, Д.Е. Намиот // International Journal of Open Information Technologies. – 2021. – №6. – С. 51-60.

32. Борисов, Д.А. Методика определения пространственно-временного состояния техногенных объектов / Д.А. Борисов // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2017. – №7. – С. 14-18.

33. Васильев, Ю.С. Теории систем и системный анализ: истоки и перспективы / Ю.С. Васильев, В.Н. Волкова, В.Н. Козлов // SAEC. – 2021. – №1. – С. 7-29.

34. Shirali, G.A. A framework for quantitative assessment of socio-technical resilient systems using Multiple Criteria Decision Making (MCDM): a case study in an oil site / G.A. Shirali, Y.T. Birgani, D. Afshari, L.M. Salahi // Iran Occupational Health. – 2020. – №17(1).

35. Бурлов, В.Г. Закон сохранения целостности объекта – методологическая основа решения задач информационной войны и обеспечения безопасности / В.Г. Бурлов // В книге: Нейрокомпьютеры и их применение. Тезисы докладов. – 2017. – С. 261-263.

36. Бабкин, А.В. Сотрудники СПБГПУ — руководители научных и научно-педагогических школ / А.В. Бабкин // Материаловедение. Энергетика. – 2014. – №1. – С. 243-245.

37. Wiedeman, C. Modeling of moral decisions with deep learning / C. Wiedeman, G. Wang, U. Kruger // Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art. – 2020. – №3(1).

38. Мельников, Ю.Б. Улучшение адекватности экономических моделей / Ю.Б. Мельников, Е.А. Онохина, С.А. Шитиков // Journal of new economy. – 2018. – №1. – С. 94-106.

39. Шевчук, В.П. Проверка адекватности математических моделей теплоэнергетических объектов / В.П. Шевчук, Е.Л. Еремина, Е.Ю. Силаева // ИВД. – 2019. – №6 (57). – С. 10.

40. Burlov, V. Safety management of the electric power supply process of the construction site, taking into account the qualification of the manager / V. Burlov, V. Mankov, M. Polyukhovich // Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – №890(1).

***Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90225.***

*Статья поступила в редакцию 08.07.2022*

*Статья принята к публикации 16.09.2022*

УДК 004.8

DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0006

## СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ В ВИДЕОПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

© Автор(ы) 2022

SPIN: 1201-5071

AuthorID: 681509

ORCID:0000-0002-4796-0776

ScopusID: 55980530400

**НИКИФОРОВ Михаил Борисович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные вычислительные машины», директор научно-образовательного центра «СпецЭВМ»  
*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина*  
(390005, Россия, Рязань, улица Гагарина, 59/1, e-mail: nikiforov.m.b@evm.rsreu.ru)

SPIN: 3779-6480

AuthorID: 919294

ORCID: 0000-0002-2812-3489

ScopusID: 57191850738

**ТАРАСОВ Андрей Сергеевич**, аспирант, ассистент кафедры «Электронные вычислительные машины»  
*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина*  
(390005, Россия, Рязань, улица Гагарина, 59/1, e-mail: vb2005@yandex.ru)

**Аннотация.** На основании сравнительного анализа существующих методов обнаружения подвижных объектов с использованием контурного анализа предложен комбинированный метод обнаружения и идентификации подвижных объектов, которые могут быть использованы в системах контроля наземного, морского и воздушного пространств. Разработана система автоматического обнаружения движущихся объектов с использованием контурного анализа, позволяющая обнаруживать одновременно несколько подвижных объектов благодаря сочетанию таких критериев как эрозия, дилатация, детектор границ Кэнни, межкадровый диспаратит, оптический поток Лукаса-Канаде, для чего создано соответствующее алгоритмическое и программное обеспечение. Данная система используется совместно с системой сопровождения объектов и используется в качестве источника входных данных для нее, позволяя повысить вероятность обнаружения и уменьшить риск ложного детектирования.

**Ключевые слова:** сопровождение, объект, видеопоследовательность, обнаружение, эрозия, дилатация, детектор границ Кэнни, межкадровый диспаратит, оптический поток.

## SYSTEM FOR AUTOMATIC DETECTION OF MOVING OBJECTS IN A VIDEO SEQUENCE

© The Author(s) 2022

**NIKIFOROV Mikhail Borisovich**, candidate of technical science, docent department of Electronic Computers  
Lead of scientific & research center "SpetsEVM"

**TARASOV Andrey Sergeevich**, graduate student, assistant department of Electronic Computers  
*Ryazan State Radio-Engineering University named after V.F. Utkin*

(390005, Russia, Ryazan, street Gagarina, 59/1, e-mails: nikiforov.m.b@evm.rsreu.ru, vb2005@yandex.ru)

**Abstract.** Combined method of moving objects detection and identification is suggested. It based on comparative analysis of existing methods of moving objects detection that use contour analysis. Suggested method can be used in ground, sea and air control systems. The system of moving objects automatic detection with use of contour analysis was developed. It allows detection of several moving objects simultaneously because of combination of following criteria: erosion, dilation, Canny edge detector, interframe disparity, Lucas-Kanade optical flow. Software and algorithm were developed to achieve this aim. This system is used together with object tracking system as source of its input data. It allows detection probability increasing and false responses risk reducing.

**Keywords:** objects tracking in video sequence, objects detection in video sequence, erosion, dilation, Canny edge detector, interframe disparity, optical flow.

**Для цитирования:** Никифоров М.Б. Система автоматического обнаружения подвижных объектов в видеопоследовательности / М.Б. Никифоров, А.С. Тарасов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022. – Т. 11. – № 3(59). – С. 39-44. – DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0006.

**Введение.** Системы видеонаблюдения применяются в различных сферах человеческой деятельности. Они располагаются в местах общественного пользования: метро, на пешеходных переходах, железнодорожных вокзалах, возле офисов, банков и автовокзалов [1, 2]. Задачи, которые решаются с их помощью, могут быть разнообразными: наблюдение за потоками дорожного движения, безопасное прохождение учащимися учебных заведений, контролирование погрузки и выгрузки товаров.

Торговые центры оснащены такими системами для предотвращения краж или оперативного поиска злоумышленников. Установка камер также актуальна для людей, проживающих в частном секторе. В большинстве случаев помимо записи видеосигнала необходимо осуществлять его цифровую обработку.

Системы обработки и анализа видеoinформации относятся к оптико-электронным системам (ОЭС) [3]. Назначение ОЭС состоит в обнаружении и сопровождении объектов, они могут также устанавливаться на подвижных носителях (самолеты, вертолеты, автомобили). Обнаружение объектов на видеопоследовательности осуществляется методом цифровой обработки, который позволяет выбирать и выделять один или несколько объектов, определять их координаты и характеристики на каждом кадре видеопоследовательности и сравнивать их с характеристиками объекта поиска [4].

Системы визуального сопровождения и обнаружения объектов применяются в следующих областях:

- охрана частной территории;
- автоматический подсчет пассажиров в общественном транспорте;
- обнаружение посторонних лиц на предприятии;
- распознавание лиц, находящихся в розыске;
- выявление противоправных действий в местах общественного пользования;
- контроль взлетно-посадочной полосы;
- дублирование функций пожарной системы (определение по видеопоследовательности очага пожара);
- космический мониторинг Земли [5-7].

Основным требованием, предъявляемым к названным системам сопровождения и обнаружения визуальных объектов, является необходимость работы в режиме реального времени. Подобные системы также должны иметь автоматизированный режим работы, который не требует от оператора (пользователя системы) серьезных усилий.

При решении задач обнаружения, сопровождения и идентификации подвижных объектов исходные данные представляют в виде пронумерованных кадров [8]. Система обнаружения подвижных объектов управляется посредством графического пользовательского интерфейса (ГПИ), обеспечивающего возможность выбора видео-последовательности и области интереса для отслеживания. Область интереса может быть выбрана автоматически на основе перемещения объектов, или же установлена оператором вручную. После того, как область интереса была определена, за данным объектом начинается наблюдение. Предложенная система позволяет осуществлять наблюдение за несколькими объектами одновременно [1].

Задачи обнаружения и сопровождения объектов являются актуальными, и рассматриваются как в Российской Федерации в научных трудах Алпатова Б.А. [4, 9], Пастушкова А.В. [10], Богуславского А.А.

[11], Потапова А.С. [12], так и за рубежом в трудах В.Д. Lucas [13], Т. Kanade [13], а также в рамках международного конкурса *Visual Object Challenge* [14], однако до сих пор они далеки от полного решения. В работе [10] рассмотрены методы обнаружения объектов, их классификация и слежение за ними с использованием глобального свойства изображения – его цветового распределения. Слежение за объектом осуществляется с использованием эллиптической области на основании четырех параметров: координат центра эллипса и радиусов эллипса по горизонтальной и вертикальной осям. В работе [15] предложена модификация стробового метода автоматического обнаружения объекта, который выявляет траекторию движения при допущении, что траектория движения допускает аппроксимацию линейной функцией. Однако такое предположение следует рассматривать как существенный недостаток данного метода.

Примером ОЭС военной сферы является разработанная на АО ГРПЗ система «Охотник» [16], дающая возможность в режиме реального времени улучшить видение изображений, обнаруживать воздушные и наземные объекты, а также оценить их параметры и построить траектории движения. Ее алгоритмическое обеспечение предусматривает работу в замкнутом контуре автосопровождения при полном или частичном заслонении целей, а также при плохом их выделении из анализируемого изображения на основе прогноза положения цели в течение заданного времени. Недостаток такой системы выражается в её дороговизне и только военной направленности.

Целью данной работы является разработка алгоритмического и программного обеспечения для системы автоматического обнаружения подвижных объектов общего назначения.

**Методология.** В том случае, если камера неподвижна, то одним из подходов к обнаружению объекта может быть вычитание фоновой составляющей. Для этого формируется новое изображение на основе двух соседних кадров:

$$Y_{res}^i = |Y_1^i - Y_2^i| \quad (1)$$

Поскольку в большинстве случаев камера и фон подвижны, то вычислять разность стоит со смещением:

$$m^i = \begin{cases} 0, Y_{res}^i < T \\ 1, Y_{res}^i \geq T \end{cases} \quad (2)$$

Предварительная обработка изображения в видеопоследовательности позволяет улучшить работу системы в ситуации дрожания камеры, а также при нестабильном освещении [17]. Для устранения влияния движения камеры применяются аффинные преобразования. Предварительная обработка изображения также включает в себя нормировку цветовой составляющей, которая состоит из двух фаз: эквализация гистограммы изображения и преобразование изображения в цветовое пространство  $YIQ$  [1]. Устранение шумовой составляющей и дефектных пикселей на изображении осуществляется путем

фильтрации.

После стабилизации видеосистема определяет направление движения фона по следующему алгоритму:

- используется одна точка в квадрате  $N \times N$ . Ее значение определяет остальные векторы в квадрате;
- точка внутри блока выбирается при помощи FAST-детектора ключевых точек [18];
- для вычисления оптического потока применяется метод Лукаса-Канаде [19, 20].

Локальный оптический поток рассчитывается по следующей формуле:

$$\begin{pmatrix} I_x(x_1, y_1) & I_y(x_1, y_1) \\ \vdots & \vdots \\ I_x(x_n, y_n) & I_y(x_n, y_n) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -I_t(x_1, y_1) \\ \vdots \\ -I_t(x_n, y_n) \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где  $u, v$  – вычисляемые переменные (вектор оптического потока),  $I_x(x_p, y_p)$ ,  $I_y(x_p, y_p)$ ,  $I_t(x_p, y_p)$  – частные производные изображения  $I$  по координатам  $x, y$  и времени  $t$ , вычисленные в точке  $(x_p, y_p)$  [21]. Метод предварительной стабилизации видео на основе

оптического потока Лукаса-Канаде увеличивает вероятность обнаружения движущихся объектов примерно на 25%.

Обнаружение и выделение движущихся объектов осуществляются с использованием контурного анализа. Контурные являются наиболее информативными составляющими изображения [22]. Точки контура представляют собой незначительную часть всех точек на изображении, поэтому работа с ними позволяет увеличить быстродействие систем обработки изображений. В качестве методов выделения контуров движущихся объектов применены эрозия, дилатация, детектор границ Кэнни, межкадровый диспаратет, оптический поток Лукаса-Канаде. На рисунке 1 приведена схема системы обнаружения и выделения подвижных объектов на видеопоследовательности. Для повышения вероятности автоматического обнаружения подвижных объектов используется комбинирование существующих методов, которое заключается в следующем.

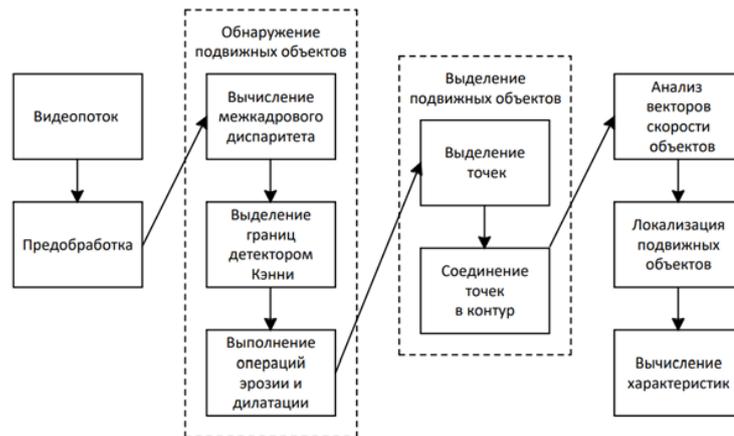


Рисунок 1 – Схема системы обнаружения и выделения подвижных объектов

1. На первоначальном этапе осуществляется вычисление межкадрового диспаратета. На вход поступают два соседних кадра из видеопоследовательности в формате  $YIQ$ .

$$Y_{res}^i = |Y_1^i - Y_2^i|, \quad (4)$$

где  $Y$  – яркостная составляющая из цветового пространства  $YIQ$ ,  $Y_{res}^i$  – значение яркостной составляющей  $i$ -го пикселя результирующего раstra,  $Y_1^i, Y_2^i$  – значение яркостной составляющей  $i$ -го пикселя на первом и втором кадрах.

$$m^i = \begin{cases} 0, & Y_{res}^i < T \\ 1, & Y_{res}^i \geq T \end{cases}, \quad (5)$$

где  $m^i$  – значение  $i$ -го элемента маски,  $T$  – порог сравнения или порог чувствительности. В маске единицы будут располагаться там, где, возможно, присутствует движение. Однако могут быть погрешности и ложные срабатывания отдельных элементов маски [23, 24].

2. Для того, чтобы исключить ложные срабатывания, используется детектор границ Кэнни. Оператор Кэнни использует фильтр, который может быть хорошо приближен к первой производной

гауссианы.

3. Далее выполняются поочередно операции морфологического закрытия для удаления шумовой составляющей и операции морфологического открытия для соединения некоторых контуров. Операции морфологического открытия и закрытия являются комбинациями операций эрозии и дилатации.

После этапа локализации осуществляется расчет характеристик для выделенных объектов и сохранение координат их контуров. Так как данная система применяется совместно с системой сопровождения подвижных объектов, то на основе текстурных признаков осуществляется проверка истинности сопровождаемого объекта, определение перекрытия его другим объектом и сброс сопровождения ложного объекта [25]. В качестве текстурных признаков применяются:

– сегментирование, основанное на распределении Гиббса

$$click = \log_2 \left( \sqrt{2\pi * variance} + \frac{img[x,y] - mean^2}{2variance} \right), \quad (6)$$

где  $img[x,y]$  – изображение из области интереса,  $variance$  – дисперсия,  $mean$  – среднее значение,  $click$  –

вычисляемое значение [26].

– вариация

$$T = \sum_{g=0}^{N-1} (g - \text{mean})^2 F(g), \quad (7)$$

где  $T$  – вычисляемое значение,  $F(g)$  – количество пикселей с яркостью  $g$ ,  $N$  – максимальная яркость [27].

При сопоставлении объектов учитывается информация за последние пять кадров.

**Результаты.** На рисунке 2(а) приведен кадр из видеопоследовательности урока в школе, а на рисунке 2(б) – результат выполнения шагов 1 – 3. Выделение подвижных объектов и их локализация

иллюстрируются рисунком 3. Цветом отмечены несколько детектированных подвижных объектов, за которыми впоследствии может быть осуществлено наблюдение. Принцип выделения подвижных объектов основан на группировке объектов по расстоянию. Если точки расположены близко, то считается, что они принадлежат одному объекту. Данный алгоритм заключается в выделении контуров движущихся объектов и их соединении. В контур добавляются те точки, которые находятся на расстоянии меньше 50 пикселей от тех точек, которые уже добавлены в контур.



а)



б)

Рисунок 2 – Автоматическое обнаружение подвижных объектов: а – кадр исходной видеопоследовательности, б – результат обнаружения нескольких подвижных объектов



Рисунок 3 – Результат выделения нескольких подвижных объектов

Как видно из рисунка 3, два объекта объединились в один. Для того, чтобы избежать подобного, применяется методика классификации векторов скоростей. Для кластеризации используется метод  $k$  means в сочетании с модифицированным индексом Калински-Харабаша. Индекс Калински-Харабаша определяется как:

$$VRC_k = \frac{SS_B}{SS_W} \times \frac{(N-K)}{(K-1)}, \quad (8)$$

где  $K$  – количество кластеров,  $N$  – количество выборок,  $SS_B$  – ошибка суммы квадратов между группами,  $SS_W$  – ошибка суммы квадратов внутри

групп. Данный подход позволяет оценить, сколько кластеров в этих условиях может быть сформировано.

На рисунке 4 изображен результат разделения объектов, исходя из направления движения. Следует отметить, что этот алгоритм способен выполнять отслеживание нескольких целей одновременно. При этом скорость работы программного обеспечения в случае увеличения количества целей изменяется незначительно.

На рисунке 5 показана зависимость времени работы алгоритма от количества целей. Эксперимент проводился на одноядерном потоке процессора.

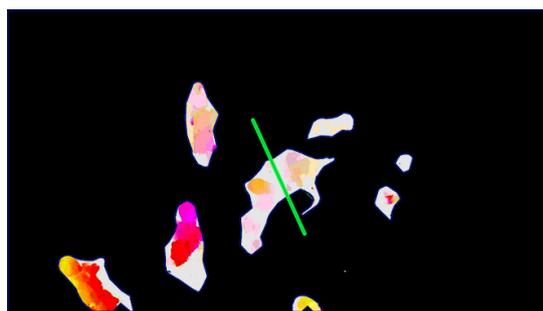


Рисунок 4 – Результат разделение объектов, исходя из направления движения

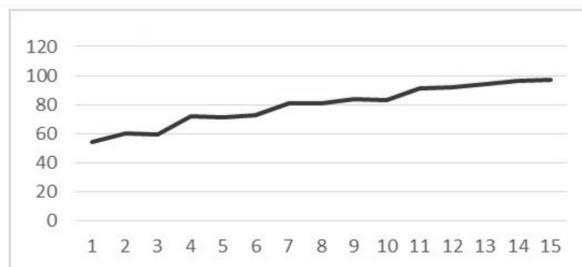


Рисунок 5 – Зависимость времени работы алгоритма от количества объектов интереса

**Обсуждение.** Для того, чтобы оценить эффективность предложенного метода обнаружения, необходимо сравнить его с существующими методами. Для этого исходные видеопоследовательности разделены на группы – сценарии поведения объекта. Под сценарием понимается совокупность определенных условий съемки, усложняющих обнаружение и сопровождение объектов [10]. Для анализа использовались следующие сценарии поведения:

- C1: маскировка объекта;
- C2: резкое изменение скорости и направления движения;
- C3: остановка объекта;
- C4: изменение яркости.

В качестве методов обнаружения рассматривались:

- M1: оптический поток;
- M2: сопоставление по ключевым точкам;
- M3: коррелятор;
- M4: экстраполяция;
- M5: предложенный метод.

В таблице 1 представлены методы, применяющиеся для обнаружения объектов, а также ряд

сценариев, в которых наиболее часто возникают ошибки обнаружения в работе алгоритмов. Методы M1 – M4 универсальны и применяются как в задачах обнаружения, так и в задачах сопровождения. Как видно из таблицы 1, ни одно из существующих решений не позволяют получить эффективный результат на всех наборах сценариев. Методы, работающие на основе локализационных алгоритмов, демонстрируют высокую точность работы, однако нацелены на уникальный класс объекта. Для реализации универсального трекера они не применимы.

Для анализа качества работы представленных методов были использованы четыре размеченных видеофрагмента (табл. 2), нацеленных на выявление качества работы при различных ограничивающих факторах.

Каждый из представленных методов был отдельно протестирован на видеопоследовательности из таблицы 2. В таблице 3 приведены время обнаружения движущегося объекта в зависимости от видеопоследовательности и применяемого метода. Результаты качества работы сведены в таблицу 4.

Таблица 1 – Оценка применимости методов обнаружения

Сценарий поведения объектов	Методы обнаружения подвижных объектов				
	M1	M2	M3	M4	M5
C1	-	-	+	+	+
C2	+	+	-	-	+
C3	-	+	+	+	+
C4	-	+	-	+	+

Таблица 2 – Представленные видео

№ видео	Наименование	Описание	Цель проверки
1	Helicopter.mp4	Съемка квадрокоптера на фоне леса	Проверить качество сопровождения небольшого объекта на сильно изменяемом фоне
2	Bird.mp4	Видео полета птиц в небе против света	Оценка качества работы трекера для исключения срабатывания на другие объекты, кратковременное пропадание объекта при нахождении за солнцем
3	Moto.mp4	Съемка мотоциклиста с неба при помощи квадрокоптера	Проверка качества работы при подвижном и сильно изменяемом фоне и неподвижном объекте
4	River.mp4	Видео с соревнований по водному слалому на горной реке	Анализ сложных ситуаций, связанных с кратковременной потерей целей, резким изменением формы объекта и генерацией различных помех в виде волн

Таблица 3 – Время обнаружения движущегося объекта

№ видео	Размер видео	M1, с	M2, с	M3, с	M4, с	M5, с
1	360	60	2	40	≤1	35
2	SD (480)	85	3	60	≤1	63
3	HD (720)	104	4	44	≤1	71
4	FHD (1080)	220	6	90	≤1	100

Таблица 4 – Качество работы представленных методов

№ видео	M1	M2	M3	M4	M5	Оценка
1	98%	89%	85%	87%	100%	+
2	21%	51%	97%	82%	99,8%	+
3	30%	99%	99%	95%	100%	+
4	76%	34%	63%	72%	98%	+

Для каждого метода был рассчитан процент правильных срабатываний (под правильным понимается выделение не менее 85% от правильной площади расположения объекта и не более 15% от фоновой части. Оценка «+» выставляется только в том случае, если объект ни разу полностью не покидал область, которую предоставил алгоритм, при этом область должна составлять не более 150% от размера цели.

**Выводы.** Из приведённых данных следует, что необходимо учитывать не один признак, а их совокупность, которая должна отвечать свойствам объекта интереса в разные моменты времени. Так как большинство методов не способны продемонстрировать одинаково высокие показатели точности на каждом сценарии, требуется разработка алгоритмического и программного обеспечения для эффективной с точки зрения достоверности и точности

решения задач выделения, отслеживания траектории, обнаружения и сопровождения объекта интереса для системы сопровождения и обнаружения объектов.

Функциональными требованиями при этом являлись:

- работа в режиме реального времени;
- высокое качество сопровождения;
- возможность одновременного обнаружения и сопровождения нескольких объектов;
- способность алгоритма «адаптироваться» к работе на маломощных устройствах;
- минимизация ложных срабатываний на идентичные объекты.

Разработанная система автоматического обнаружения подвижных объектов на видеопоследовательности соответствует функциональным требованиям, заявленным выше, что свидетельствует о ее эффективности. Для сокращения времени работы алгоритма обнаружения подвижных объектов планируется применение технологий параллельных вычислений.

Разработанная система автоматического обнаружения подвижных объектов на видеопоследовательности применяется совместно с системой сопровождения подвижных объектов, предоставляя ей исходные данные. В систему сопровождения подвижных объектов передаются координаты контуров обнаруженных объектов, а также их характеристики. На основе вычисленных характеристик для выделенных областей осуществляется наблюдение, проверка истинности сопровождаемого объекта и сброс сопровождения ложного объекта.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Tarasov A., Potapova V., Belyakov P., Melnik O. The developing of targets tracking complex // В сборнике: Proceedings of 2018 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTs 2018. Electronic publication. – 2018. – С. 888-892.
2. Тарасов А.С., Никифоров М.Б., Беляков П.В. Системы обнаружения и сопровождения подвижных объектов: методические указания к лабораторным работам // Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: Рязань. – 2021. – 48 с.
3. Богданов А.А., Ключко В.К., Фельдман А.Б. Исследование алгоритма формирования трехмерных изображений на базе бортовой оптико-электронной системы наблюдения // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета – 2012. – № 42-1. – С. 70-72
4. Алпатов Б.А., Бабаян П.В., Балашов О.Е., Степашкин А.И. Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление / М.: Радиотехника – 2008г. – С. 176.
5. Ворошилина Е.П., Ворошилин Е.П., Тисленко В.И. Алгоритмы сопровождения подвижных объектов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники – 2009. – № 2 (20). – С. 53-58
6. Bolme D. S., Beveridge R. J., Draper B. A., Lui Y. M. Visual Object Tracking using Adaptive Correlation Filters // Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), – 2010. – PP. 2544–2550.
7. Алпатов Б. А., Бабаян П. В., Балашов О. Е., Степашкин А. И. Системы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. – М.: Радиотехника, – 2008. – С. 175
8. Чендаров А.В., Мамон А.Ю. Идентификация данных при траекторном сопровождении маневрирующих объектов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2015. – № 2. – С. 49-58
9. Klochko V.K., Strotov V.V., Alpatov B.A., Smirnov

S.A., Ershov M.D. Detecting and tracking of a group of objects multi-position passive scanning millimeter-wave system // В сборнике: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 13. Сер. "Millimetre Wave and Terahertz Sensors and Technology XIII" – 2020. – С. 1154104

10. Пастушков А.В., Калайда В.Т. Программная система слежения за объектом в видеопотоке // Южно-Сибирский научный вестник. – 2013. – № 1 (3). – С. 90-91

11. Соколов, С. М., Богославский А. А., Фёдоров Н. Г., Виноградов П. В. Система технического зрения для информационного обеспечения автоматической посадки и движения по ВПП летательных аппаратов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 1(162). – С. 96–109

12. Филатов, В. И., Потапов А. С. Система обучения визуальным понятиям на основе соотнесения лексем и ключевых точек // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2016. – Т. 16, – № 4. – С. 689–696

13. Lucas, B. D., Kanade T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision // Proceedings of Imaging Understanding Workshop. – 1981. – С. 121–130

14. Visual Object Classes Challenge 2012 (VOC2012) // URL: <http://host.robots.ox.ac.uk/pascal/VOC/voc2012/>

15. Фисенко В. Т., Можейко В. И., Фисенко Т. Ю., Вилесов Л. Д., Фёдоров Д. А. Метод автоматического обнаружения и отслеживания многих малоразмерных объектов в условиях априорной неопределенности // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2014. – Т. 57. – № 10. – С. 17-22.

16. Система наведения «Охотник» // URL: <https://aviation21.ru/izdelie-oxotnik-innovacionnaya-sistema-nashlemnogo-celeukazaniya/>

17. Епишин Ю.В. Помехоустойчивый алгоритм обнаружения вращающегося источника сигнала и его реализации в системе технического зрения // Электронные информационные системы. – 2022. – № 1 (32). – С. 29-38

18. Bolme D. S., Beveridge R. J., Draper B. A., Lui Y. M. Visual Object Tracking using Adaptive Correlation Filters // Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), – 2010. – PP. 2544–2550.

19. Kim S., Jay Kuo C.-C. A Stochastic Approach for Motion Vector Estimation in Video Coding // Proc. of SPIE, Vol. 2304, Neural and Stochastic Methods in Image and Signal Processing III. – 1994. – pp. 111-122.

20. Акинин М.В., Никифоров М.Б., Таганов А.И. Нейросетевые системы искусственного интеллекта в задачах обработки изображений: монография. М.: Научно-техническое издательство «Горячая линия - Телком», – 2016. – С. 152.

21. Беляков П.В., Никифоров М.Б. Вариационный метод вычисления оптического потока в системе-на-кристалле // Цифровая обработка сигналов. – 2018. – № 3. – С. 76-82.

22. Медведева Е.В., Каралупин К.А., Курбатова Е.Е. Метод выделения движущихся объектов в видеопотоке на основе оценки их границ // Машинное обучение и анализ данных. – 2015. – Т. 1. – № 12. – С. 1696-1705.

23. Tudan Li. CVOnline: Motion and time sequence Analysis. [Электронный ресурс], 2002. Режим доступа: <http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/> (дата обращения: 14.10.2018).

24. Южакова Ю.О., Царева С.А. Оценка результативности интегрированной системы менеджмента производителя нефтедобывающего оборудования в контексте адаптации алгоритмов нечеткой логики // Научные исследования. – 2018. – № 6 (25). – С. 4-8.

25. Tarasov A., Muratov Y., Nikiforov M., Baranchikov A. Intelligent video computer tracking system // В сборнике: 13th International Conference ELEKTRO 2020, ELEKTRO 2020 - Proceedings. 13. – 2020. – С. 9130254.

26. V. Potapova, A. Tarasov, N. Grinchenko Image search by content system development // в сборнике: Proceedings of IEEE East-West Design&Test Symposium (EWDTs2018). – 2018 – С. 625-629

27. Мицель А.А., Колодников Н.В., Протасов К.Т. Непараметрический алгоритм текстурного анализа аэрокосмических снимков // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 1. – С. 65-70.

Статья поступила в редакцию 07.07.2022

Статья принята к публикации 16.09.2022

УДК 004.9

DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0007

**ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА СИСТЕМЫ  
ВИЗУАЛИЗАЦИИ ТРЕНАЖЕРНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ПОДГОТОВКИ ШАХТЕРОВ**

© Автор(ы) 2022

SPIN: 8154-6049

AuthorID: 956902

ORCID: 0000-0002-7842-4466

ScopusID: 57196485592

**АРХИПОВ Алексей Евгениевич**, аспирант

кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»

*Тамбовский государственный технический университет*

(392000, Россия, Тамбов, улица Советская, 106, e-mail: alexeiarkh@gmail.com)

SPIN: 7269-8304

AuthorID: 1120215

ORCID: 0000-0002-4741-1451

ScopusID: 57361762500

**НАЗАРОВА Александра Олеговна**, студентка кафедры

«Системы автоматизированной поддержки принятия решений»

*Тамбовский государственный технический университет*

(392000, Россия, Тамбов, улица Советская, 106, e-mail: nazarova.al.ol@yandex.ru)

SPIN: 8948-8510

AuthorID: 751895

ORCID: 0000-0002-3450-5213

ScopusID: 56104232400

**ОБУХОВ Артем Дмитриевич**, доктор технических наук, доцент

кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений»

*Тамбовский государственный технический университет*

(392000, Россия, Тамбов, ул. Советская, 106, e-mail: obuhov.art@gmail.com)

**Аннотация.** В статье рассмотрена проблема выбора оптимальной системы визуализации и конфигурации виртуальных тренажерных комплексов для обучения и отработки плановых действий на рабочем месте и в условиях нестабильной внешней среды. Расчет сложности разрабатываемого обеспечения исходит из выбора качественного представления визуальной системы и минимальной программно-аппаратной конфигурации, позволяющей выработать необходимые практические навыки для обучаемого, исходя из требований к условиям работы, используемому производственному оборудованию и элементам инфраструктуры. Для комплексной отработки возможных производственных сценариев необходимо разработать математическую модель, предусматривающую множество возможных состояний как пользователя, так и его окружения в виртуальной реальности, после чего поставить и решить задачу структурно-параметрического синтеза системы визуализации. Такой подход обеспечивает отзывчивость системы на действия пользователя, а значит, позволяет обеспечить лучший иммерсивный опыт. Анализ и формализация структуры программно-аппаратного обеспечения рассматривается на примере расчета виртуального тренажерного комплекса для подготовки специалистов горнодобывающей отрасли. Предложены несколько конфигураций, различающихся по компоновке тренажера, и на их основе рассчитаны стоимость и время разработки систем. В результате тестирования фокус-групп на разных конфигурациях предложен оптимальный выбор тренажерного комплекса в соответствии с его эффективностью, стоимостью и временем разработки.

**Ключевые слова:** структурно-параметрический синтез, виртуальная реальность, трехмерное моделирование, профессиональная подготовка, горнодобывающая промышленность, экономическая эффективность, математическая модель.

**FORMULATION OF THE PROBLEM OF STRUCTURAL-PARAMETRIC SYNTHESIS  
OF THE VISUALIZATION SYSTEM OF THE SIMULATION COMPLEX FOR TRAINING MINERS**

© The Author(s) 2022

**ARKHIPOV Alexey Evgenievich**, postgraduate student of the

Department Computer-integrated Systems in Mechanical Engineering

**NAZAROVA Alexandra Olegovna**, student of the Department Automated Decision Support Systems

**OBUKHOV Artem Dmitrievich**, doctor of technical sciences,

associate professor of the Department Automated Decision Support Systems

*Tambov State Technical University*

(392000, Russia, Tambov, st. Soviet, 106,

*e-mails: alexeiarrh@gmail.com, nazarova.al.ol@yandex.ru, obuhov.art@gmail.com)*

**Abstract.** The article deals with the problem of choosing the optimal visualization system and configuration of virtual training complexes for training and practicing planned actions at the workplace, and in an unstable environment. The calculation of the complexity of the software being developed is based on the choice of a high-quality representation of the visual system and the minimum software and hardware configuration that allows developing the necessary practical skills for the trainee, based on the requirements for working conditions, used production equipment and infrastructure elements. For a comprehensive development of possible production scenarios, it is necessary to develop a mathematical model that provides for many possible states of both the user and his environment in virtual reality, after which to set and solve the problem of structural-parametric synthesis of the visualization system. This approach ensures that the system is responsive to user actions, which means it allows you to provide a better immersive experience. Analysis and formalization of the structure of software and hardware is considered on the example of calculating a virtual simulator complex for training specialists in the mining industry. Several configurations are proposed, differing in the layout of the simulator, and on their basis, the cost and time of developing systems are calculated. As a result of testing focus groups on different configurations, the optimal choice of the training complex was proposed in accordance with its efficiency, cost and development time.

**Keywords:** structural-parametric synthesis, virtual reality, 3D modeling, professional training, mining industry, economic efficiency, mathematical model.

*Для цитирования:* Архипов А.Е. Постановка задачи структурно-параметрического синтеза системы визуализации тренажерного комплекса для подготовки шахтеров / А.Е. Архипов, А.О. Назарова, А.Д. Обухов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022. – Т. 11. – № 3(59). – С. 45-50. – DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0007.

**Введение.** При реализации тренажерных комплексов (ТК) одной из существенных проблем является выбор программного и аппаратного обеспечения, на котором они основаны [1]. При решении подобных задач зачастую отталкиваются от требований технического задания, выбирая наиболее функциональные компоненты в рамках материальных и временных ресурсов, но не всегда решение обеспечивает наилучшие показатели по качеству профессиональной подготовки.

Одним из существенных факторов ТК, влияющим на формирование необходимых компетенций, является качество визуализации рабочего пространства. Это позволяет максимально задействовать зрительную память при отработке моделей поведения при различных штатных и аварийных сценариях производственной деятельности. При разработке программ повышения квалификации с использованием ТК необходимо использовать различные средства визуализации для максимальной эффективности отображения обучающих сценариев и формирования необходимых умений и навыков при оптимальных экономических затратах [2]. Знания возможно формировать как посредством традиционных технологий обучения, так и с использованием технологий цифровизации. Первоначальные умения можно качественно формировать и при использовании обучающих видеороликов, но навыки выполнения трудовых функций и принятия наиболее важных решений целесообразнее развивать в процессе производственной деятельности, в том числе и в виртуальной реальности.

Тренажерная подготовка наиболее востребована и получила ускоренное развитие при подготовке к деятельности в отраслях с высокими рисками, где особенно велика значимость человеческого фактора,

где невозможно обучение на реально действующих объектах: транспорт, оборонный комплекс, работа по ликвидации чрезвычайных ситуаций, медицина, энергетика и т. д. [3-10]. Требования к параметрам системы визуализации (СВ) в каждой из этих областей применения тренажеров могут значительно отличаться. В ряде отраслей точность воспроизведения реальных процессов должна быть максимальной, что предъявляет высокие требования к аппаратному и программному обеспечению, и, как следствие, повышает стоимость системы визуализации [11]. В иных отраслях, напротив, даже низкокачественная и упрощенная имитация процессов, происходящих в технической системе, позволит обеспечить требуемый уровень подготовки специалистов с минимальными издержками [12]. Специфика разработки систем визуализации тренажерных комплексов рассматривается в работах следующих ученых: S. Helle, A. Haller, Г.Я. Пятибратов, О.А. Кравченко [13-15]. В результате установлено, что каждая предметная область обладает своей спецификой, оказывающей непосредственное влияние на структуру тренажерного комплекса и его функционирование [16-19].

На основе проведенного анализа ТК средств и технологий визуализации получено, что не поставлена задача выбора компонентов для системы визуализации ТК в формализованном виде, не определены критерии оптимизации, позволяющие среди множества альтернативных вариантов выбрать наилучший.

*Целью* исследования является повышение экономической эффективности и качества подготовки персонала при использовании тренажерных комплексов за счет выбора оптимальных параметров системы визуализации. Для достижения поставленной цели поставим и решим задачу структурно-параметрического синтеза СВ ТК на основе

предлагаемого математического обеспечения. В качестве предметной области выбраны ТК для подготовки персонала горнодобывающей промышленности (шахтеров). Актуальность данной задачи обусловлена как социальной значимостью стабильной работы данной отрасли для общественной жизни, так и высоким уровнем аварийных ситуаций, вызванных как техногенными факторами, так и природными явлениями, а нередко, и действиями работников, которые либо недостаточно квалифицированы, либо нарушают установленные правила техники безопасности.

**Методология.** На первом этапе исследования проанализируем и формализуем процессы, протекающие в СВ ТК для подготовки шахтеров. На основе анализа предметной области формируется модель технической системы шахты. В данную модель входит формализованное представление основных объектов шахты, процессов их взаимодействия, а также описание физических процессов, протекающих в данной технической системе. После анализа протекающих в шахте процессов была сформирована структура основных объектов шахты, их состояний, возможных действий обучаемого, а также составлен ряд ограничений на выполнение операций.

Далее на основе перечня операций формируется модель деятельности персонала [20], включающая следующие этапы: обнаружение источника пожара, перемещение к телефону, взятие трубки, оповещение о чрезвычайной ситуации, перемещение к шкафу с огнетушителями, открытие шкафа, взятие огнетушителя в руки, перемещение к источнику пожара на безопасное расстояние, тушение пожара до его полной ликвидации, утилизация огнетушителя, оповещение об успешном устранении пожара по телефону.

На следующем этапе необходимо формализовать непосредственно параметры и структуру СВ ТК. Предлагаемая модель описания и оценки эффективности СВ ТК представляет собой кортеж

$$M_{VS}(TS, P) = \langle HW_{VS}, SW_{VS}, R \rangle, \quad (1)$$

где  $HW_{VS} \subset HW$  – множество аппаратных компонентов, используемых в системе визуализации АТК;  $HW_{VS} \subset HW$  – множество программных компонентов, используемых в системе визуализации АТК;  $R$  – оценка системы визуализации АТК по набору метрик.

Структура системы визуализации определяет набор используемых программных и аппаратных компонентов (модулей  $m_k$ ), используемых при реализации системы визуализации:

$$S_{VS} \subseteq HW_{VS} \times SW_{VS},$$

$$S_{VS} = \{m_k\} \subseteq \{hm_{vs,i}\} \cup \{sm_{vs,i}\}, \quad (2)$$

где  $S_{VS}$  – область совместимых программных и аппаратных компонентов из всего множества сочетаний.

При этом структура  $S_{VS}$  определяет лишь категории используемых компонентов (например, шлем VR, монитор, контроллеры, трехмерная визуализация), а

не конкретные модели аппаратных компонентов или конечные программные реализации.

Под параметрами системы визуализации будем понимать множество значений, определяющих выбор конкретных моделей аппаратных компонентов  $MHW_{VS}$  и настройки программных модулей  $MSW_{VS}$ :

$$P_{VS} = \begin{cases} HW_{VS} \rightarrow MHW_{VS} = \{mhm_{vs,i}\}, \\ SW_{VS} \rightarrow MSW_{VS} = \{msm_{vs,i}\}. \end{cases} \quad (3)$$

Каждой модели  $mhm_{vs,i}$  можно поставить в соответствие множество  $R_{HW_i}$  характеристик, включающее ее потребительские свойства (например, разрешение экрана, вес, стоимость, размеры и так далее). Аналогично для каждого  $msm_{vs,i}$  задается  $R_{SW_i}$  – множество характеристик программного компонента, включающее его потребительские свойства (например, объем занимаемой памяти, количество полигонов, требования к вычислительной мощности, используемые библиотеки программного кода, язык программирования и так далее).

Совокупность выбранных программных  $SW_{VS}$  и аппаратных  $HW_{VS}$  компонентов СВ может быть оценена по набору метрик:  $R_S, R_P, R_C, R_{TT}, R_E$  – оценки визуализации, стоимость и время разработки, стоимость эксплуатации, время подготовки и количество допущенных ошибок в процессе подготовки с использованием текущей конфигурации СВ.

Рассмотрим данные оценки более подробно. Стоимость разработки программного обеспечения СВ рассчитывается по формуле:

$$R_S(S_{VS}, P_{VS}) = \sum_{i \in S_{VS}, P_{VS}} (sd_i + sa_i) \quad (4)$$

где  $sd_i$  – стоимость разработки программного обеспечения  $i$ -го компонента СВ, для расчета могут использоваться известные методики, например, СОСОМО II;  $sa_i$  – стоимость разработки дополнительного программного обеспечения для обеспечения взаимосвязанной работоспособности других элементов СВ при использовании  $i$ -го компонента СВ. Рассчитывается по тем же методам что и  $sd_i$ .

Время разработки (человеко-месяцев) программного обеспечения СВ рассчитывается по формуле:

$$R_T(S_{VS}, P_{VS}) = \sum_{i \in S_{VS}, P_{VS}} (td_i + ta_i) \quad (5)$$

где  $td_i$  – время разработки программного обеспечения  $i$ -го компонента СВ;  $ta_i$  – время разработки дополнительного программного обеспечения для  $i$ -го компонента СВ.

Стоимость эксплуатации (рублей) СВ можно определить по формуле:

$$R_C(S_{VS}, P_{VS}) = S_f + S_p + S_a + S_e + S_r + S_{em} + S_{oh} \quad (6)$$

где  $S_f$  – затраты на покупку и доставку аппаратных компонентов СВ;  $S_p$  – зарплата обслуживающего персонала СВ;  $S_a$  – амортизационные отчисления;  $S_e$  – затраты на потребление энергии;  $S_r$  – затраты на ремонт или восстановление;  $S_{em}$  – затраты на приобретение расходных материалов;  $S_{oh}$  – накладные расходы.

Время обучения (часов)  $R_{TT}$  с использованием

текущей конфигурации СВ ТК:

$$R_{TT}(S_{VS}, P_{VS}) = \frac{\sum_{j=1}^{nP} t_j(S_{VS}, P_{VS})}{nP} \quad (7)$$

где  $t_j$  – общее время подготовки  $j$ -го обучающегося при использовании конфигурации СВ компонента со структурой  $S_{VS}$  и параметрами  $P_{VS}$ ;  $nP$  – общее количество обучающихся.

Количество ошибок  $R_E$  в процессе обучения изменяется от 0 до 1 и определяется как среднее из суммы ошибок по всем упражнениям, компетенциям и обучаемым:

$$R_E(S_{VS}, P_{VS}) = \frac{\sum_{j=1}^{nP} \sum_{k=1}^{nK} nE_{jk}(S_{VS}, P_{VS})}{\sum_{j=1}^{nP} \sum_{k=1}^{nK} nP \cdot nK \cdot nQ}, \quad (8)$$

где  $nE_{jk}$  – количество ошибок, допущенных при выполнении заданий с использованием выбранных структуры и параметров СВ ( $S_{VS}, P_{VS}$ ) в рамках проверки освоения  $k$ -ой компетенции (из всех  $nK$  компетенций);  $nQ$  – общее количество упражнений.

Задача структурно-параметрического синтеза СВ ТК формулируется следующим образом: определить такое множество элементов структуры  $S_{VS}^* \subseteq S_{VS}$  и параметров  $P_{VS}^* \subseteq P_{VS}$  аппаратных и программных модулей СВ ТК, при которых оценки системы визуализации достигают экстремальных значений, а именно: стоимость разработки, продолжительность разработки, стоимость эксплуатации, продолжительность подготовки, количество допущенных ошибок – минимума:

$$\{S_{VS}^*, P_{VS}^*\} = \underset{S_{VS}, P_{VS}}{\operatorname{argmin}} \{R_S(S_{VS}, P_{VS}), R_T(S_{VS}, P_{VS}), R_C(S_{VS}, P_{VS}),$$

$$R_{TT}(S_{VS}, P_{VS}), R_E(S_{VS}, P_{VS})\}, \quad (9)$$

при выполнении соотношений (1)-(8) модели описания и оценки эффективности СВ и следующих ограничений:

- на время разработки:  $R_T \leq t_T$ ,
- на продолжительность подготовки:  $R_{TT} \leq t_{TR}$ ,
- на экономические ресурсы:  $R_S + R_C \leq E^*$ ,
- на соответствие осваиваемых компетенций требуемым:  $PK \subseteq PK^*$ ,

где  $t_T$  – максимальное время разработки (человеко-месяцев);  $PK^*$  – набор необходимых компетенций;  $t_{TR}$  – максимально возможная продолжительность процесса подготовки персонала;  $E^*$  – максимально допустимые затраты на реализацию и обслуживание системы визуализации.

Так как задача (9) сформулирована как многокритериальная по Парето, при ее решении для конкретной предметной области возможна замена некоторых составляющих критерия оптимальности ее решения ограничениями, т.е. использование метода главного критерия или частичной линейной свертки. В качестве основного критерия выберем совокупные затраты  $R_S + R_C$ .

**Результаты.** Рассмотрим решение поставленной задачи. Определим конкретные ограничения:

$$PK^* = (pk_1, pk_2, pk_3) \quad (10)$$

где компетенция  $pk_i$  – это умение проводить

комплексный анализ внутренней и внешней среды деятельности, адекватно оценивать свои возможности и планировать оптимальное использование имеющихся ресурсов в сложившейся ситуации;  $pk_2$  – психологическая устойчивость к стрессу, способность преодолевать психологическую инерцию при деятельности в чрезвычайных ситуациях;  $pk_3$  – знание производственного регламента, нормативной документации о правилах деятельности в штатных и аварийных ситуациях.

$$t_T = 8, t_{TR} = 40, E^* = 1500000. \quad (11)$$

Значения  $t_T$  и  $E^*$  определяются техническим заданием на разработку ТК. Максимальная продолжительность обучения  $t_{TR}$  задается типовой программой по курсу «Промышленная безопасность» [21].

В результате структурного синтеза СВ методом перебора получено три возможных варианта компоновки: максимальный, основанный на максимальных оценках компонентов по отображению, взаимодействию и перемещению, включая адаптивную беговую платформу. Второй вариант (оптимальный) является сбалансированным, так как ориентирован на использование максимальных по качеству средств отображения и взаимодействия, но не использует дорогостоящих компонентов перемещения. Третий вариант (минимальный) основан на использовании монитора, клавиатуры и мыши, что значительно снижает стоимость решения. Однако из-за стоимости беговой платформы более миллиона рублей, максимальная конфигурация не принимала участия в дальнейших расчетах. Сравнение оптимальной и минимальной конфигураций по ряду метрик представлено в таблице 1.

Для оценки качества разработанной СВ ТК по метрикам продолжительности подготовки и количества ошибок проведены исследования на фокус-группе из 10 человек (студенты бакалавриата направления «Техносферная безопасность»). В группу входило 8 мужчин и 2 женщины, средний возраст:  $19.9 \pm 0.36$  лет. Выбор участников обусловлен требованиями к целевой аудитории, проходящей первоначальную подготовку в угольно и горнодобывающей отрасли: молодая возрастная группа, преобладание мужчин, наличие базовых навыков и умений в области пожаротушения и охраны труда.

Таблица 1 – Сравнение конфигураций СВ

	Оптимальная	Минимальная
Затраты на разработку (основные)	598 157,00	598 157,00
Затраты на разработку (на детализацию сцены)	277 000,00	216 000,00
Затраты на эксплуатацию	220 000,00	100 000,00
Итоговые затраты $R_C$	1 095 157,00	914 157,00
Оценка качества компонентов $R_C + R_C$	28,83	14,47
Срок разработки, человеко-месяцев	7,3	6,7

Один этап обучения для группы занимал 1 час, включая инструктаж, подготовку, работу с

тренажером, этап рефлексии и оценки. Значения среднего и минимального качества обучения для каждой подгруппы указано на рисунке 1. Будем считать, что группа обучена, когда количество ошибок (максимальное в группе и среднее) ниже

0,1, что обеспечивает достижение уровня требуемой компетентности и профпригодности работников [21]. Продолжительность обучения оценивалась по времени выполнения не менее 90% заданий (что соответствует количеству ошибок в 0.1).

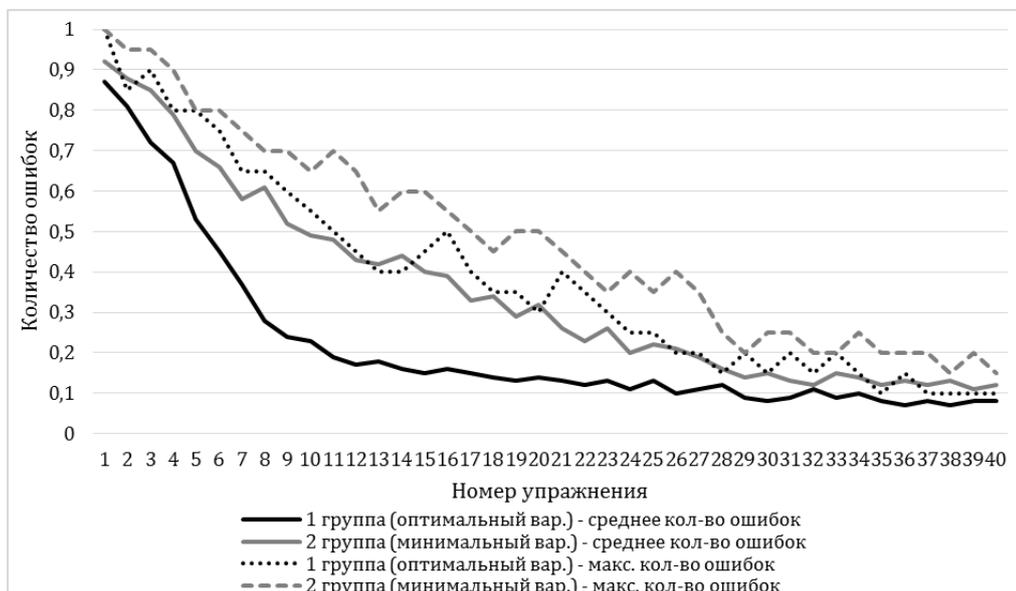


Рисунок 1 – Динамика изменения количества ошибок в двух подгруппах

**Обсуждение.** При использовании оптимальной конфигурации в среднем группа обучена уже после 28 занятия, полностью – после 34, что удовлетворяет условию задачи. Среднее количество ошибок при достижении ограничения по времени обучения (40 занятий по часу) для оптимальной конфигурации составило 0.08, что также удовлетворяет условиям. Для минимальной конфигурации данный показатель достигнут не был даже после 40 часов обучения. Максимальное количество ошибок при минимальной конфигурации также не удовлетворяет условиям (равно 0.15 на 40-м занятии). Таким образом, задача структурно-параметрического синтеза системы визуализации СВ ТК успешно решена при выборе оптимальной конфигурации. Полученные результаты подтверждают эффективность представленного алгоритма структурно-параметрического синтеза системы визуализации тренажерных комплексов.

**Заключение.** В работе поставлена и решена задача структурно-параметрического синтеза системы визуализации тренажерных комплексов с применением критериев качества и скорости освоения, стоимости и продолжительности разработки программного обеспечения, качества визуализации, стоимости и затрат на обслуживание системы визуализации, учитывающая ограничения на совместимость компонентов. Разработана модель описания и оценки эффективности системы визуализации для формализации структуры системы и связей между компонентами, свойств и параметров компонентов, влияющих на качественные и количественные характеристики системы визуализации, основанная на формализации

физических процессов в виртуальной среде, учитывающая особенности деятельности персонала при организации процесса освоения на тренажерных комплексах и позволяющая формализовать структуру системы визуализации, определить временные и стоимостные затраты и спрогнозировать возможности системы на этапе проектирования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Трашкова А.В. Выбор способа реализации тренажера-симулятора для системы трехмерного моделирования открытых горных работ / Трашкова А.В., Вицентий А.В. // Труды Кольского научного центра РАН. – 2020. – Т. 11. – №. 8-11. – С. 83-90.
2. Архипов, А.Е. Проектирование системы визуализации тренажерного комплекса на основе компетентного подхода / Архипов, А.Е., Попов, А.И., Обухов, А.Д. // Вопросы журналистики, педагогики, языкознания. – 2020. – Т. 39. – №. 3. – С. 378-390.
3. Климов, А.А. Об особенностях использования тренажеров при реализации образовательных программ (на примере подготовки специалистов для транспорта) / Климов, А.А., Заречкин, Е.Ю., Куприяновский, В.П. // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2019. – Т. 15. – №. 2. – С. 477-487.
4. Злотников К.А. Научно обоснованные рекомендации по синтезу тренажеров с элементами виртуальной реальности / Злотников, К.А., Недеров, В.М., Нестеренко, А.А., Золотарев, А.С. // Экономика. Право. Инновации. – 2020. – №. 3. – С. 43-47.
5. Sharma, S. Improving emergency response training and decision making using a collaborative virtual reality environment for building evacuation / Sharma, S. // International Conference on Human-Computer Interaction. – Springer, Cham, – 2020. – С. 213-224.
6. Обухов, А.Д. Организация взаимодействия с виртуальной реальностью на основе беговой платформы для комплексного обучения специалистов / Обухов, А. Д., Дедов, Д. Л., Вострикова, В. В., Теселкин, Д. В., Суркова, Е. О. // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2021. – Т. 17. – №. 4. – С. 14-20.

7. Волкова, М.М., Манурова, Р.А., Шайдуллина, Д.Н. Применение виртуальных тренажеров для обучения специалистов нефтегазовой отрасли // Вестник технологического университета. – 2019. – Т. 22. – №. 4. – С. 115-121.
8. Немтинов В.А. Создание виртуальной технологической лаборатории и организация обучения при подготовке кадров высшей квалификации / Немтинов В.А., Манаенков И.М., Немтинова Ю.В. // Высшее образование в России. – 2020. – Т. 29. – № 2. – С. 159-168.
9. Bernardes, S.M.F. Methodological approaches for use virtual reality to develop emergency evacuation simulations for training, in emergency situations / Bernardes, S.M.F., Rebelo, F., Vilar, E., Noriega, P., Borges, T. // Procedia Manufacturing. – 2015. – Т. 3. – С. 6313-6320.
10. Likitweerawong, K. The virtual reality serious game for learning driving skills before taking practical test / Likitweerawong, K., Palee, P. // 2018 International Conference on Digital Arts, Media and Technology (ICDAMT). – IEEE, – 2018. – С. 158-161.
11. Makransky, G. A structural equation modeling investigation of the emotional value of immersive virtual reality in education / Makransky, G., Lilleholt, L. // Educational Technology Research and Development. – 2018. – Т. 66. – №. 5. – С. 1141-1164.
12. Obukhov A. et al. Methodology for the Development of Adaptive Training Systems Based on Neural Network Methods // Proceedings of the Computational Methods in Systems and Software. – Springer, Cham, 2021. – С. 238-253.
13. Helle, S. Miracle Handbook: Guidelines for Mixed Reality Applications for culture and learning experiences / Helle, S., Lehtonen, T., Woodward, C., Turunen, M., Salmi, H. – 2017.
14. Haller, A. Transshipment Simulators for Training of Ports' Personnel / Haller, A., Putz, L. M., Schauer, O. // Advanced Engineering Forum. – Trans Tech Publications, – 2015. – Т. 13. – С. 277-281.
15. Pyatibratov, G.Y. Design Principles and Implementation of Advanced Simulators for Training Astronauts to Work in Zero or Low Gravity Conditions / Pyatibratov, G.Y., Kravchenko, O.A., Kivo, A.M. // Procedia Engineering. – 2016. – Т. 150. – С. 1410-1414.
16. Kwok P.K. Crisis management training using discrete-event simulation and virtual reality techniques / Kwok, P.K., Yan, M., Chan, B.K., Lau, H.Y. // Computers & Industrial Engineering. – 2019. – Т. 135. – С. 711-722.
18. Li, L. Application of virtual reality technology in clinical medicine / Li, L., Yu, F., Shi, D., Shi, J., Tian, Z., Yang, J., Jiang, Q. // American journal of translational research. – 2017. – Т. 9. – №. 9. – 3867 с.
19. Fombona-Pascual, A. Augmented Reality, a Review of a Way to Represent and Manipulate 3D Chemical Structures / Fombona-Pascual, A., Fombona, J., Vicente, R. // Journal of chemical information and modeling. – 2022. – Т. 62. – №. 8. – С. 1863-1872.
20. Ketelhut, D.J. Studying situated learning in a multiuser virtual environment / Ketelhut, D.J., Dede, C., Clarke, J., Nelson, B., Bowman, C. // Assessment of problem solving using simulations. – Routledge, – 2017. – С. 37-58.
21. Архипов, А.Е. Разработка модели деятельности персонала в тренажерных комплексах / Архипов, А.Е., Сиухин, А.А., Сидорчук, А.О., Скворцов, В.И. // Новые информационные технологии в научных исследованиях. – 2018. – С. 106-107.
22. Седельников, Г.Е. Разработка компьютерного видеоинформационного комплекса непрерывного развития компетентности работников угольных предприятий в сфере охраны труда / Седельников, Г.Е. // дис. – Кемерово : дис. канд. техн. наук. – 2020.

**Работа выполнена при финансовой поддержке  
Российского фонда фундаментальных исследований,  
в рамках научного проекта № 20-37-90123  
Аспиранты, договор 20-37-90123\20 от 25.08.2020 г.**

*Статья поступила в редакцию 25.07.2022*

*Статья принята к публикации 16.09.2022*

УДК 004.415:621.31

DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0008

## ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОДЕЛИ НАГРУЗКИ ПО МАССИВАМ ИЗМЕРЕНИЙ ПАССИВНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

© Автор(ы) 2022

SPIN-код: 3883-6827

AuthorID: 176010

ORCID: 0000-0003-1808-4700

ScopusID: 56486150000

**БАЦЕВА Наталья Ленмировна**, кандидат технических наук,  
доцент отделения электроэнергетики и электротехники  
*Томский политехнический университет*  
(634050, г. Томск, проспект Ленина, 30, email: batsevan@tpu.ru)

SPIN-код: 2520-0648

AuthorID: 784320

ORCID: 0000-0001-8176-1925

ScopusID: 56485418100

**ПАНКРАТОВ Алексей Владимирович**, кандидат технических наук,  
директор Представительства  
*АО «СО ЕЭС» в Томской области*  
(634041, г. Томск, проспект Кирова, 36, email: PankratovAV@kuzb.so-ups.ru)

SPIN-код: 4980-1050

AuthorID: 1157780

ORCID: 0000-0001-5333-1661

ScopusID: 57224316094

**ЖУЙКОВ Александр Константинович**, аспирант отделения электроэнергетики и электротехники  
*Томский политехнический университет*  
(634050, г. Томск, проспект Ленина, 30, email: zhuykov\_aleksandr@mail.ru)

**Аннотация.** В статье представлено программное обеспечение (ПО) для определения модели статических характеристик нагрузки (СХН) по напряжению. Программное обеспечение способно проводить полный цикл обработки больших массивов данных, полученных при проведении пассивного эксперимента в энергосистемах (ЭС). Для реализации ПО использован высокоуровневый язык программирования *C#* со статической типизацией и автоматическим управлением памятью, а также с библиотекой статистической обработки данных *Accord.NET*. В ПО реализована возможность подключения к базам данных реального времени оперативно-информационных комплексов (ОИК) для получения исходных данных в реальном времени и последующего приведения массивов измерений режимных параметров к единой оси времени. Программное обеспечение содержит уникальные программные коды кластеризации данных с помощью *EM*-алгоритма совместно с рандомизированным алгоритмом Сьюгер-Джеймса для автоматического определения числа кластеров в массивах, а также код для учёта влияния внешней электрической сети на режимные параметры, что отличает его от существующих ПО. Предусмотрено построение необходимых для решения рассматриваемой технологической задачи эллипсов рассеивания за счёт кода для их отображения с заданными параметрами. Показан результат работы ПО при обработке данных для определения модели *СХН* по напряжению крупного промышленного потребителя. Верификация результатов с результатами, полученными в активном эксперименте, показала допустимую погрешность расчётов.

**Ключевые слова:** кластеризация, линейная регрессия, *EM*-алгоритм, *Accord.NET*, алгоритм Сьюгер-Джеймса, статические характеристики нагрузки по напряжению, пассивный эксперимент, реакция внешней сети.

## SOFTWARE FOR THE IDENTIFICATION OF A LOAD MODEL BY ARRAYS, MEASURED BY PASSIVE EXPERIMENT

© The Author(s) 2022

**BATSEVA Natalia Lenmirovna**, candidate of technical sciences,  
associate professor of the electrical engineering department  
*Tomsk Polytechnic University*  
(634050, Tomsk, Lenina Avenue, 30, email: batsevan@tpu.ru)

**PANKRATOV Aleksey Vladimirovich**, candidate of technical sciences, director  
*JSC «SO UPS» Office in Tomsk region*  
(634041, Tomsk, Kirova Avenue, 36, email: PankratovAV@kuzb.so-ups.ru)

**ZHUYKOV Aleksandr Konstantinovich**, postgraduate student of the electrical engineering department

Tomsk Polytechnic University

(634050, Tomsk, Lenina Avenue, 30, email: zhuykov\_aleksandr@mail.ru)

**Abstract.** This paper demonstrates the software for an identification of voltage static load characteristic's model by passive experiment data arrays. The software is able to provide the full cycle of the big data processing, measured by the passive experiment in power systems. The high-level, statically typed programming language C# with the automatic memory management, and, also, with the statistical data manipulation library Accord.NET is used. The dial-in capability to the real time data base of operative-information complexes is implemented. This capability is programmed for receiving data in a real time and following reduction of arrays of mode parameters to the unified time base. The software includes unique software codes for clustering by EM- algorithm in combination with the randomized Suger-James algorithm for the autodetection of cluster's numbers in arrays. It also consists of the program code for taking into account the external power grid influence on mode parameters. These facts make the software different from existing ones. Apart from this, the software provides ellipse of dispersion building based on the code for their displaying with fixed parameters. This paper also presents the operating result of the software work when the data arrays for the industrial consumer is processed and the voltage static load characteristic's mode is identified. The verification with the results after the active experiment shows that the error is in the acceptable boundaries.

**Keywords:** clustering, linear regression, EM algorithm, Accord.NET, Suger-James algorithm, static load characteristics of voltage, passive experiment, power grid response.

*Для цитирования:* Бацева Н.Л. Программное обеспечение для определения модели нагрузки по массивам измерений пассивного эксперимента / Н.Л. Бацева, А.В. Панкратов, А.К. Жуйков // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022. – Т. 11. – № 3(59). – С. 51-56. – DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0008.

**Введение.** Разработка ПО и внедрение программно-вычислительных комплексов (ПВК) для решения технологических задач в электроэнергетике начались вместе с появлением первых персональных компьютеров, а в 80-х годах XX века уже были разработаны и применены в ЭС цифровые системы для управления режимами работы. Оснащённость отрасли высокопроизводительной компьютерной техникой позволяет разрабатывать и совершенствовать существующие платформенные решения для расчёта установившихся и переходных электрических режимов, например, *RastrWin3*, *RusTab*, *Eurostag*, а также программно-технические комплексы (ПТК) для сбора, обработки телеметрической информации и решения технологических задач в реальном времени, такие как централизованная система противоаварийной автоматики, система мониторинга запасов устойчивости (СМЗУ) [1].

Все без исключения ПВК и ПТК работают на базе цифровых расчётных моделей ЭС, в которых наряду с другими элементами моделируются узлы нагрузки, наиболее подверженные количественным и качественным изменениям при изменении режимов работы ЭС. Востребованным способом задания узлов нагрузки в ПВК является их моделирование статическими характеристиками нагрузки (СХН) по напряжению, так как СХН позволяют повысить точность расчёта электрических режимов и, соответственно, точность решения технологических задач [2-4]. Несмотря на это, большинство моделей нагрузок, введённых в ПВК, уже не актуальны, что вносит погрешность в расчёты [4-8]. Именно по этой причине задача определения действительных моделей СХН по напряжению остаётся актуальной для электроэнергетики.

СХН по напряжению – это функциональные зависимости активной  $P_{load}$  и реактивной  $Q_{load}$

мощностей нагрузки от напряжения  $U$  в узле нагрузки  $P_{load}(U)=f_p(U)$ ;  $Q_{load}(U)=f_Q(U)$  [4].

Одной из форм представления этих зависимостей в ПВК является линейная модель (1) [2-5]:

$$S_{load}(U) = S_{base} \cdot \left( a_0 + a_1 \cdot \left( \frac{U}{U_{base}} \right) \right) \quad (1)$$

где  $a_0$ ,  $a_1$  – коэффициенты линейной модели СХН для мощности нагрузки в относительных единицах (о.е.);  $S_{base}$  – мощность нагрузки (активная или реактивная), которая соответствует базовому (номинальному) напряжению  $U_{base}$ . Существует возможность получения модели СХН более высокого порядка (полином второй степени) с помощью методов статистической обработки данных, измеренных в активном эксперименте для узла нагрузки [9]. Однако активный эксперимент предполагает проведение значительного количества предварительных организационно-технических мероприятий в ЭС и предусматривает принудительное вмешательство в режим её работы, а для каждого отдельного узла нагрузки необходима организация отдельного активного эксперимента. Поэтому проведение пассивных экспериментов становится перспективным направлением с точки зрения определения модели СХН по напряжению, так как исключается принудительное вмешательство в режим работы ЭС [9, 11], можно постоянно получать измерения режимных параметров в реальном времени [11-13], нет необходимости в организации эксперимента. Отметим и недостатки пассивного эксперимента: отсутствие вмешательства в режим работы ЭС не позволяет исследовать изменение мощности нагрузки в максимально широком диапазоне изменения напряжений, что часто приводит к получению именно линейной модели СХН [11, 13]; линия регрессии, построенная по экспериментальным данным, не будет отражать реальной зависимости мощности

нагрузки от напряжения, так как в пассивном эксперименте наблюдается значительная дисперсия по мощности нагрузки, обусловленная различными её состояниями [7, 13]. Существует и главная проблема, заключающаяся в отсутствии ПО, позволяющего проводить полную статистическую обработку данных для определения линейной модели СХН. В [7, 9-13] описаны функциональные возможности различных ПО для решения этой задачи, но эти ПО разрозненны, что сильно замедляет процесс определения модели СХН и усложняет использование результатов расчёта в реальном времени, например, в СМЗУ. Кроме того, они не учитывают влияние внешней электрической сети на режимные параметры, а исходная информация о числе кластеров (состояниях нагрузки) предполагается заранее известной, что в подавляющем большинстве случаев не соответствует реальному поведению нагрузки [7, 11, 13-17]. Описанные проблемы потребовали создания ПО для определения модели СХН по напряжению.

**Методология.** ПО реализует полный цикл обработки данных пассивного эксперимента вплоть до определения коэффициентов линейной модели СХН. Блок-схема алгоритма определения линейной модели СХН представлена на рисунке 1.

*Целью* статьи является представление нового ПО, разработанного на языке программирования С#, для определения модели СХН по напряжению по массивам измерений, полученных в пассивном эксперименте при постоянной актуализации модели СХН в реальном времени, с учётом влияния внешней электрической сети, включающего реализацию алгоритма автоматического определения числа кластеров.

В статье приведены фрагменты кода разработанного ПО, которые реализуют уникальные функции, предназначенные для определения модели СХН.

Загрузка массивов данных, соответствующих параметрам режима, осуществляется в формате \*.csv. Возможности ПО позволяют использовать подключение к базам данных реального времени ОИК для получения массивов измерений.

После загрузки данных выполняется объединение измерений напряжения, активной и реактивной мощностей для формирования группы измерений, которые будут приведены к общей оси времени. Массивы представляются в виде списка типа *double*, включающего значения напряжения, активной и реактивной мощностей. Каждому значению напряжения сопоставляется значение активной или реактивной мощностей нагрузки с помощью приведения измерений к общей оси времени командами *CommonTimeAxisCreate*, *GetIntervals*, *List<T>* [18, 19]. *CommonTimeAxisCreate* принимает в качестве аргументов списки пользовательского типа *TimeValue*:

```
1 public DateTime Time { get; set; }
2 public double Value { get; set; }
3 public TimeValue(DateTime inputTime,
double inputValue)
```

```
4 {
5     Time = inputTime;
6     Value = inputValue;
7 }
```

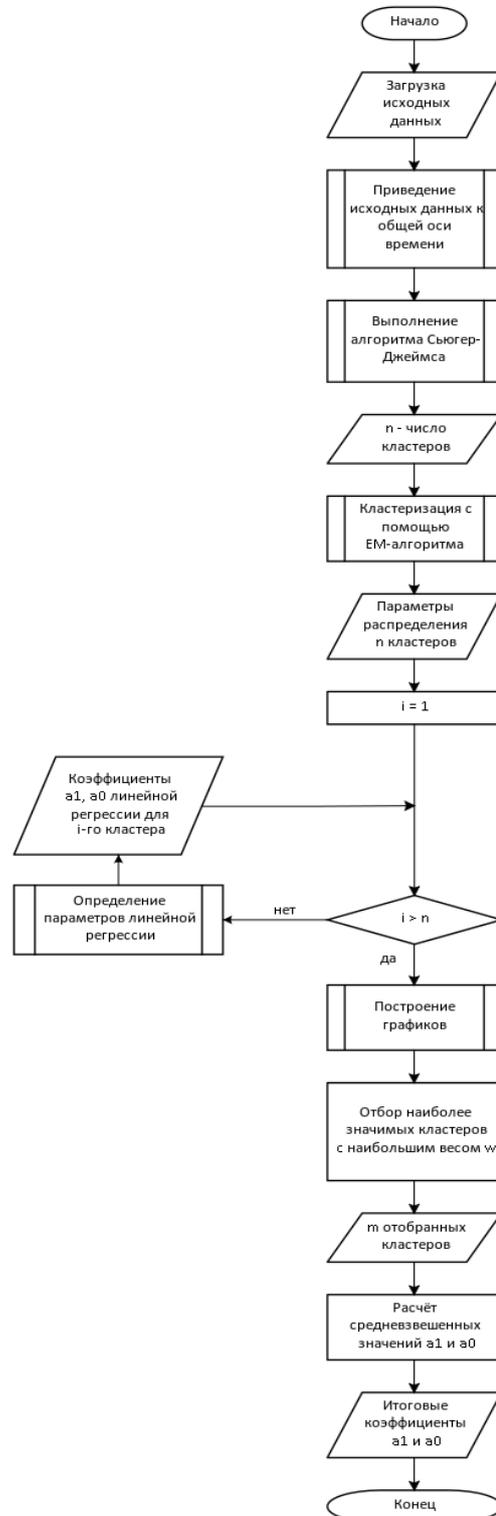


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма определения модели СХН

*GetIntervals* используется для приведения массивов напряжения к оси времени массивов активной или реактивной мощностей:

```
1 public static List<double> GetIntervals(DateTime[] requiredTimeArray, DateTime[] inputTimeArray, List<double> data)
```

```

2 {
3     int outputArraySize = requiredTimeArray.Length;
4     List<double> outputArray = new List<double>(outputArraySize);
5     for (int i = 0; i < outputArraySize; i++) outputArray.Add(0);
6     int dataTimeArraySize = inputTimeArray.Length;
7     while (outputArraySize > 0)
8     {
9         while ((inputTimeArray[dataTimeArraySize - 1] > requiredTimeArray[outputArraySize - 1])
10            && (dataTimeArraySize > 1))
11         {
12             dataTimeArraySize--;
13         }
14         outputArray[outputArraySize - 1] = data[dataTimeArraySize - 1];
15         outputArraySize--;
16     }
17     return outputArray;
18 }

```

*List<T>* используется для хранения массивов, позволяет упростить операции с добавлением элементов и использовать измерения, приведённые к единой оси времени.

Программный код для регрессии и кластеризации написан на языке программирования *C#* с использованием набора библиотек *Accord.NET*. Применение *Accord.NET* обусловлено наличием реализованного алгоритма кластеризации *k*-средних [7, 13, 18] и *EM*-алгоритма оценки максимального правдоподобия [11, 20]. Кроме того, в *Accord.NET* реализована многопоточность при выполнении обработки данных, что позволяет ускорить расчёты [21].

*EM*-алгоритм для кластеризации массивов использован по следующим причинам: он позволяет разделить исходные данные на кластеры наиболее точно [11, 19, 20]; результатом работы *EM*-алгоритма являются параметры распределения найденных кластеров, которые затем используются для определения коэффициентов модели *СХН*. *EM*-алгоритм имеет недостаток: необходимо знать число кластеров, *clusterNumber* [14]. Этот недостаток устранён с помощью алгоритма Сьюгер-Джеймса для определения числа кластеров в массивах [15]. Для работы алгоритма Сьюгер-Джеймса выполнена циклическая кластеризация данных по алгоритму *k-means* с переменным числом кластеров. Предварительно задаётся максимальное число кластеров, до достижения которого и будет выполняться цикл расчёта:

```

1 Accord.MachineLearning.GaussianMixtureModel EM = new Accord.MachineLearning.GaussianMixtureModel(clusterNumber);
2 Accord.MachineLearning.GaussianClusterCollection clusters = EM.Learn(observations);

```

Процесс кластеризации выполняется с помощью функции *kmeans.Learn(observations)*:

```

1     = kmeans.Learn(observations);
2     distortions[i - 1] = kmeans.Error * size / inputList.Length;
3     transformedDistortions[i - 1] = Math.Pow(distortions[i - 1], (double)-1.0 / i);

```

```

4     jumps[i - 1] = transformedDistortions[i - 1] - transformedDistortions[i - 2];
5 }
6 int clusterCount = jumps.ToList().LastIndexOf(jumps.Max()) + 1;
7 return clusterCount;
8 }

```

Для отбора значимых кластеров, по которым будет определяться итоговая модель *СХН*, предусмотрена возможность построения графиков, чтобы исключить кластеры с аномальными значениями коэффициентов линейной регрессии [11]. Построение графиков осуществляется с помощью средств библиотеки *System.Windows.Forms.DataVisualization.Charting*. Следует отметить, что при отображении результатов кластеризации выделенные кластеры представляют собой эллипсы рассеивания. В *Accord.NET* и *System.Windows.Forms.DataVisualization.Charting* нет встроенных средств для построения эллипсов рассеивания, поэтому в ПО внедрён код для отображения эллипса рассеивания с заданными параметрами кластера «*cluster*» и цветом «*color*».

Для учёта эффекта влияния внешней сети [22] реализовано взаимодействие с ПБК для расчёта электрических режимов через библиотеку *ASTRALib.dll*:

```

1 IRastr Rastr = new Rastr();
2 Rastr.Load(RG_KOD.RG_REPL, pathToFile, "");

```

Необходимый доступ к другим элементам ПО осуществляется с помощью интерфейса *ITable*:

```

1 ITable Node = Rastr.Tables.Item("node");
и интерфейса ICol:
1 ICol NodeNumber = Node.Cols.Item("ny");

```

**Результаты.** ПО апробировано в 8-ми различных узлах нагрузки. В статье в качестве примера приведено определение модели *СХН* для одного из крупных промышленных узлов при 10-ти различных начальных приближениях для *EM*-алгоритма.

Результаты кластеризации для  $k=76953$  измерений напряжения, активной и реактивной мощностей представлены в таблице 1.

На основании весов кластеров  $w$  в таблице 1, исключая кластеры с аномальными значениями, можно сделать вывод, что значимыми кластерами являются: для активной мощности – 1 и 3, для реактивной мощности – 3 и 5.

**Обсуждение.** Для отобранных кластеров получены средневзвешенные значения коэффициентов итоговой модели *СХН* (табл. 2).

По результатам таблицы 2 видно, что ПО позволяет с достаточной точностью определить коэффициенты *СХН*. По активной мощности разница между коэффициентами, полученными с помощью ПО и в активном эксперименте, составляет 0,01 о.е., а по реактивной мощности – 0,44 о.е., что является приемлемым результатом. Для 10-ти вычислительных экспериментов разброс значений составил 0,2 о.е. для  $a_{1cp}$  и 0,9 о.е. –  $b_{1cp}$  относительно приведённых в таблице 2.

Таблица 1 – Результаты кластеризации

№	w	mU, кВ	mP, МВт	r	$K_{UQ}$ , кВ·МВт	$D_p$ , МВт <sup>2</sup>	$D_U$ , кВ <sup>2</sup>	$a_0$	$a_1$
Результаты кластеризации по активной мощности									
1	0,296	219,079	64,602	-0,070	-0,171	15,690	0,376	2,560	-1,560
2	0,154	221,811	13,931	-0,267	-0,544	18,620	0,222	30,346	-29,346
3	0,207	217,737	60,867	0,186	0,412	18,096	0,271	-4,196	5,196
4	0,125	219,401	55,637	-0,528	-4,027	63,884	0,910	19,377	-18,377
5	0,218	222,316	0,134	-0,116	-0,001	0,001	0,240	9,907	-8,907
Результаты кластеризации по реактивной мощности									
№	w	mU, кВ	mQ, Мвар	r	$K_{UQ}$ , кВ·Мвар	$D_p$ , Мвар <sup>2</sup>	$D_U$ , кВ <sup>2</sup>	$b_0$	$b_1$
1	0,067	220,122	34,669	-0,766	-9,817	145,301	1,130	54,478	-53,478
2	0,155	221,879	8,439	-0,368	-0,540	10,144	0,213	43,277	-42,277
3	0,189	217,695	53,491	-0,133	-0,190	7,696	0,264	4,055	-3,055
4	0,205	222,317	0,020	-0,027	0,000	0,001	0,249	16,257	-15,257
5	0,384	219,030	48,328	-0,403	-1,090	16,048	0,455	12,453	-11,453

Таблица 2 – Средневзвешенные значения коэффициентов итоговой модели СХН

Коэффициенты итоговой модели СХН, полученные с помощью ПО, о.е.				Коэффициенты итоговой модели СХН, полученные в активном эксперименте, о.е.			
$a_{\text{ср}}$	$a_{\text{оср}}$	$b_{\text{ср}}$	$b_{\text{оср}}$	$a_{\text{ср}}$	$a_{\text{оср}}$	$b_{\text{ср}}$	$b_{\text{оср}}$
1,22	-0,22	-8,69	9,69	1,21	-0,21	-8,25	9,25

**Выводы.** Разработанное ПО позволяет:

– производить целостную статистическую обработку массивов данных, графически отображать результаты;

– использовать набор библиотек *Accord.NET*, *EM*-алгоритм максимизации правдоподобия совместно с алгоритмом автоматического определения числа кластеров, что можно отнести к новизне исследования;

– учитывать влияние внешней электрической сети на параметры режима.

Полученные с помощью разработанного ПО коэффициенты линейной модели СХН верифицированы с коэффициентами, полученными при проведении активного эксперимента. Погрешность в определении коэффициентов находится в допустимых пределах для таких расчётов.

В целях совершенствования и развития ПО планируется:

– добавление опции выбора пользователем других алгоритмов кластеризации в сочетании с рандомизированным алгоритмом Сьюгер-Джеймса;

– реализация алгоритма преобразования линейной модели СХН в полиномиальную модель.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Бацева Н.Л., Фоос Ю.А. Повышение точности расчёта объёмов управляющих воздействий в централизованной системе противоаварийной автоматики при оценивании состояния энергосистем // Вестник Чувашского университета. – 2021. – № 3. – С. 5–20. DOI: 10.47026/1810-1909-2021-3-5-20.
2. S. Ram, S. Daram, P. S. Venkataramu, M. Nagaraj. Analysis of exponential and polynomial load models using newton-raphson method with hybrid power flow controller. International Journal of Control and Automation. vol. 11, №11. pp. 43-56. – 2018. DOI: 10.14257/ijca.2018.11.11.04.
3. M. S. Hossan, H. M. Mesbah Maruf and B. Chowdhury, "Comparison of the ZIP load model and the exponential load model for CVR factor evaluation," 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/PESGM.2017.8274490.
4. Milanovic, J.V., Yamashita, K., Martinez Villanueva, S., Djokic, S.Z., Korunovic, L.M. "International industry practice

on power system load modeling" (2013) IEEE Transactions on Power Systems, 28 (3), pp. 3038-3046.

5. Bokhari, A., Alkan, A., et. al. "Experimental determination of the ZIP coefficients for modern residential, commercial, and industrial loads" (2014) IEEE Transactions on Power Delivery, 29 (3), pp. 1372-1381.

6. Скамбин, А.Н. Особенности определения статических характеристик нагрузки на промышленном предприятии / А.Н. Скамбин // Естественные и технические науки. – 2015. – №3 (81). – С. 116-118.

7. X. Zhang, S. Grijalva, and M. J. Reno, "A time-variant load model based on smart meter data mining," in 2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition, vol. 2014-October, no. October. IEEE, jul 2014, pp. 1–5.

8. Advanced Load Modeling—Entergy Pilot Study, EPRI, Palo Alto, CA, and Entergy, Inc., New Orleans, LA: 2004. 1011391.

9. Экспериментальные исследования и получение статических характеристик нагрузки по напряжению узла электрической сети с комплексной нагрузкой / О.А. Бушуева, А.И. Кулешов, А.Ю. Мурзин и др. // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XVIII Бенардосовские чтения): материалы Междунар. науч.-техн. конф. – 2015. – С. 163–166.

10. Ji, Yuting et al. "Data-Driven Load Modeling and Forecasting of Residential Appliances." IEEE Transactions on Smart Grid 11 (2020): 2652-2661.

A. V. Pankratov, N. L. Batseva, E. S. Polyakova, A. S. Tavlintsev, I. L. Lapatin, and I. Y. Lipnitskiy, "Application of expectation maximization algorithm for measurement-based power system load modeling," in 2019 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), April 2019, pp. 1–5.

11. Тавлинцев А.С., Суворов А.А. Статистически равновесные состояния нагрузки в задаче идентификации статических характеристик нагрузки // Вестник ЮжноУральского государственного университета. Сер. Энергетика. 2017. Т. 17. № 2. С. 23-28. doi: 10.14529/power170203.

12. Chen, F. & Liu, H.-T & Huang, Z. & Zhang, X.-J. (2013). Probabilistic load model based on improved k-means clustering algorithm. Dianli Xitong Baohu yu Kongzhi/Power System Protection and Control. 41. 128-133.

13. Фролов В.В., Слипенченко С.Е., Приходько О.Ю. Метод расчета числа кластеров для алгоритма k-means // Экономика. Информатика. 2020. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metod-rascheta-chisla-klasterov-dlya-algoritma-k-means> (дата обращения: 26.03.2022).

14. Sugar C., James G. Finding the number of clusters in a data set: An information theoretic approach // J. of the American Statistical Association. 2003. No. 98. P. 750–763.

15. Wierzbach, Slawomir & Kłopotek, Mieczysław. (2018). Modern Algorithms of Cluster Analysis. 34. 10.1007/978-3-319-

69308-8.

16. Backhaus, Klaus & Erichson, Bernd & Gensler, Sonja & Weiber, Rolf & Weiber, Thomas. (2021). Cluster Analysis. 10.1007/978-3-658-32589-3\_8.

17. Tomasi, G.; Berg, F.V.D.; Andersson, C. Correlation optimized warping and dynamic time warping as preprocessing methods for chromatographic data. J. Chemom. 2004, 18, 231–241. J. Liang, L. Bai, C. Dang and F. Cao,

18. Killeen, Daniel & Watkins, Oliver & Sansom, Catherine & Andersen, David & Gordon, Keith & Perry, Nigel. (2017). Fast Sampling, Analyses and Chemometrics for Plant Breeding: Bitter Acids, Xanthohumol and Terpenes in Lupulin Glands of Hops (*Humulus lupulus*). Phytochemical Analysis. 28. 50-57. 10.1002/pca.2642.

19. F. Gonzalez-Longatt, J. Rueda, I. Erlich, W. Villa, and D. Bogdanov, "Mean Variance Mapping Optimization for the identification of Gaussian Mixture Model: Test case," in IS'2012 - 2012 6th IEEE International Conference Intelligent Systems, Proceedings, 2012, pp. 158–163.

20. C. D. Souza, "A Tutorial on Principal Component Analysis with the accord.net Framework," Computer Science, 2012, <http://arxiv.org/abs/1210.7463>.

21. Pankratov, A., Zhuykov, A.K., Polishchuk, V., Postoyankova, K., & Shuvalova, A. (2021). Load Model Identification using Steady-state Measurements for Power System Control. Journal of Physics: Conference Series, 1901.

*Статья поступила в редакцию 17.07.2022*

*Статья принята к публикации 16.09.2022*

УДК 681.121.8

DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0009

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЧИСЛЕННЫХ И АНАЛИТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ  
МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ «РАСХОДОМЕРНАЯ ТРУБКА – ЖИДКОСТЬ» В  
КОРИОЛИСОВЫХ РАСХОДОМЕРАХ**

© Авторы 2022

SPIN: 5378-0207

AuthorID: 644194

ORCID: 0000-0003-2197-6419

**ГУДКОВА Екатерина Александровна**, аспирант,  
старший преподаватель кафедры «Информационные технологии и системы»  
*Пензенский государственный технологический университет*

(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/улица Гагарина, д. 1а/11, e-mail: gudkova-penza@yandex.ru)

SPIN: 6169-8590

AuthorID: 448228

ORCID: 0000-0002-1313-6826

ResearcherID: P-7345-2015

ScopusID: 55895350100

**ТАРАНЦЕВА Клара Рустемовна**, доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Биотехнология и техносферная безопасность»  
*Пензенский государственный технологический университет*

(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/улица Гагарина, д. 1а/11, e-mail: krtar2018@bk.ru)

SPIN: 9986-0973

AuthorID: 614496

ORCID: 0000-0002-2071-5404

ResearcherID: B-5784-2016

ScopusID: 7005080984

**МИХЕЕВ Михаил Юрьевич**, доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Информационные технологии и системы»  
*Пензенский государственный технологический университет*

(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/улица Гагарина, д. 1а/11, e-mail: mix1959@gmail.com)

**Аннотация.** Статья посвящена сравнительному анализу существующих аналитических и численных моделей для решения задачи взаимодействия колеблющейся расходомерной трубки с протекающим через нее потоком жидкости в кориолисовых расходомерах для оценки возможности их применения для практических целей и внесения корректировок в работу приборов на месте их эксплуатации. В основу методики исследований положены аналитические методы исследования, системный анализ физических процессов, протекающих в исследуемой системе, обработка и анализ имеющихся в открытом доступе моделей системы «расходомерная трубка – жидкость», их обобщение с целью выявления влияния принятых допущений на точность измерения массового расхода. Установлено, что аналитические модели позволяют выявить влияние температуры, давления и пульсации потока на точность измерения массового расхода в кориолисовых расходомерах, а также получать упрощенные модели описываемой системы без специального программного обеспечения. Возможность применения аналитических моделей ограничена простой формой расходомерной трубки и строго ограниченной областью применимости. Использование численных моделей, основанных на теории балок или оболочек и *ID*-модели жидкой среды, со слабосвязными алгоритмами сопряжения подзадач не позволяют исследовать влияние характеристик потока на выходной сигнал расходомера. В то же время, численные методы моделирования системы «расходомерная трубка – жидкость» с жесткосвязным алгоритмом сопряжения позволяют проводить оценку конструкции расходомера, а именно определять точки установки датчиков и источника колебаний, выявлять участки возникновения турбулентности, рассчитывать опарафинивание трубки и его влияние на скорость протекания жидкости, рассчитывать амплитуду и частоту колебаний в зависимости от формы расходомерной трубки и др. Возможность применения численных *3D*-моделей ограничена высокими вычислительными и временными затратами.

**Ключевые слова:** кориолисов расходомер, «расходомерная трубка – жидкость», численные модели, аналитические модели.

**COMPARATIVE ANALYSIS OF NUMERICAL AND ANALYTICAL METHODS FOR MODELING THE  
«FLOW TUBE – LIQUID» SYSTEM IN CORIOLIS FLOWMETERS**

© The Author(s) 2022

**ГУДКОВА Ekaterina Aleksandrovna**, postgraduate student,  
senior lecturer of the Department of Information Technologies and Systems

**TARANTSEVA Klara Rustemovna**, doctor of technical sciences, professor,  
head of the department «Biotechnology and technosphere safety»  
**MIKHEEV Mikhail Yurievich**, doctor of technical sciences, professor,  
head of the department « Information Technologies and Systems »  
*Penza State Technological University*  
(440039, Russia, Penza, Baydukov passage/Gagarina Street, 1a/11,  
e-mails: [gudkova-penza@yandex.ru](mailto:gudkova-penza@yandex.ru), [krtar2018@bk.ru](mailto:krtar2018@bk.ru), [mix1959@gmail.com](mailto:mix1959@gmail.com))

**Abstract.** The article is devoted to a comparative analysis of existing analytical and numerical models for solving the problem of the interaction of an oscillating flow tube with a fluid flow flowing through it in Coriolis flow meters to assess the possibility of their application for practical purposes and to make adjustments to the operation of devices at their place of operation. The research methodology is based on analytical research methods, a systematic analysis of the physical processes occurring in the system under study, processing and analysis of publicly available models of the "flow tube - liquid" system, and their generalization in order to identify the influence of the assumptions made on the accuracy of mass flow measurement. It has been established that analytical models make it possible to reveal the effect of temperature, pressure, and flow pulsation on the accuracy of mass flow measurement in Coriolis flow meters, as well as to obtain simplified models of the described system without special software. The possibility of using analytical models is limited by the simple shape of the flow tube and a strictly limited area of applicability. The use of numerical models based on the theory of beams or shells and a 1D model of a liquid medium with weakly coupled algorithms for pairing subtasks does not allow us to study the effect of flow characteristics on the flow meter output signal. At the same time, numerical methods for modeling the "flow tube-liquid" system with a rigidly coupled interface algorithm make it possible to evaluate the design of the flow meter, namely, to determine the installation points of the sensors and the source of oscillations, to identify areas of turbulence, to calculate the waxing of the tube and its effect on the fluid flow rate, calculate the amplitude and frequency of oscillations depending on the shape of the flow tube, etc. The possibility of using numerical 3D-models is limited by high computational and time costs.

**Keywords:** coriolis flow meter, «flow tube – liquid», numerical models, analytical models.

**Для цитирования:** Гудкова Е.А. Сравнительный анализ численных и аналитических методов моделирования системы «расходомерная трубка – жидкость» в кориолисовых расходомерах / Е.А. Гудкова, К.П. Таранцева, М.Ю. Михеев // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022. – Т. 11. – № 3(59). – С. 57-63. – DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0009.

**Введение.** Кориолисовы расходомеры позволяют измерить массовый расход и плотность текучих сред с высокой точностью в широком диапазоне массовых расходов. В связи с большим прикладным их значением созданы и применяются различные типы кориолисовых расходомеров [1]. Соответственно, разнообразны и созданные модели кориолисовых расходомеров, которые можно классифицировать по различным признакам, например: геометрическим (одно- или трехмерная система «расходомерная трубка – жидкость»); способу решения (аналитическое или численное); распределены или сосредоточены их параметры и др. [2].

При моделировании системы «расходомерная трубка – жидкость» решают задачу взаимодействия колеблющейся расходомерной трубки с протекающим через нее потоком жидкости (*Fluid-Structural Interaction – FSI*). При этом используются сопряженный и раздельный подходы. Сопряженный подход подразумевает построение единой математической модели и дальнейшую дискретизацию, результатом которой является формирование общей системы алгебраических уравнений [3]. Раздельный – основан на независимом решении систем уравнений каждой подзадачи, что приводит к необходимости реализации дополнительной процедуры согласования решений подзадач на границах сопряжения [3]. Эти подходы реализованы в современных программных продуктах,

таких как *ANSYS, COMSOL Multiphysics, SolidWorks* и пр.

Преимущество сопряженного подхода состоит в том, что при его реализации не требуется выполнять итерации при решении задач гидродинамики и механики твердого тела. В раздельном подходе время моделирования увеличивается за счет увеличения количества итераций связи на каждом временном шаге. Поэтому там, где итерации сопряжения сходятся медленно, целесообразно использовать сопряженный подход. Он лучше описывает физическую природу моделируемого явления, и позволяет получить согласованное решение для задач гидродинамики и механики твердого тела. Однако, он также обладает рядом существенных недостатков [4]. Во-первых, одновременное решение всех уравнений громоздко и требует больших вычислительных затрат. Во-вторых, для реализации данного метода необходимо использование общего математического аппарата для решения всех уравнений, что не позволяет, в частности, учесть специфику подзадач для организации эффективных вычислений [4,7]. Поэтому применимость сопряженного подхода для решения задач *FSI* ограничена [4].

Существенным преимуществом раздельного подхода является то, что он позволяет использовать признанные и эффективные коды, разработанные для решения уравнений жидкости и уравнений

колебания расходомерной трубки [5-7]. Недостатком – то, что он проявляет неустойчивость, так как на каждом временном шаге численные решения физических подзадач не согласованы между собой [4]. Алгоритм для сопряжения связанных задач взаимодействия колеблющейся расходомерной трубки с протекающим потоком жидкости, должен обеспечивать минимальные вычислительные затраты и оптимальную точность, по степени сопряжения он может быть слабосвязанным/явным (*wFSI*) и жестко связанным/неявным (*sFSI*) [4,6].

Анализ имеющихся в этой области данных показал, что при численном моделировании кориолисовых расходомеров чаще применяются *1D*-модели, полученные путем упрощения *3D*-геометрии системы «расходомерная трубка – жидкость». Используют методы конечных разностей, спектральных или конечных элементов. В наиболее распространенных *1D*-моделях расходомерная трубка рассматривается как балка Эйлера-Бернулли [8-11] или балка Тимошенко [12-16], а движение жидкости моделируется однородной нерастяжимой массивной нитью, протягиваемой вдоль оси трубы с постоянной скоростью [2]. Однако, не смотря на то, что одномерные модели довольно легко реализовать, они не способны отразить физическую картину явлений, протекающих в кориолисовых расходомерах. В то же время трехмерные численные модели [5, 26-36] позволяют корректно описывать процессы, проходящие в системе «расходомерная трубка – жидкость».

Таким образом, аналитические модели течения жидкости в кориолисовых расходомерах [1, 9, 16-22] позволяют провести исследования в общем виде, получать соотношения, характеризующие поведение системы «расходомерная трубка – жидкость» при изменении ее параметров, например, установить зависимость влияния температуры на точность измерения массового расхода. Однако они применимы лишь для кориолисовых расходомеров с простой геометрической формой расходомерной трубки (*U*-образная трубка, прямая). Из-за громоздкости аналитических моделей, или невозможности их получения, применение аналитических методов для исследования кориолисовых расходомеров ограничено. В последнее время, для этих целей чаще используют численные методы, позволяющие решать более широкий круг задач.

В данной статье исследована область применения аналитических и численных моделей для решения задачи взаимодействия колеблющейся расходомерной трубки с протекающим через нее потоком жидкости (*FSI*).

**Методология.** Целью данной работы является сравнительный анализ существующих аналитических и численных моделей для решения задачи взаимодействия колеблющейся расходомерной трубки с протекающим через нее потоком жидкости (*FSI*) в кориолисовых расходомерах для оценки возможности их применения для практических целей и внесения

корректировок в работу приборов на месте их эксплуатации. В основу методики исследований положены аналитические методы исследования, системный анализ физических процессов, протекающих в исследуемой системе, обработка и анализ имеющихся в открытом доступе моделей системы «расходомерная трубка – жидкость», их обобщение с целью выявления влияния принятых допущений на точность измерения массового расхода.

**Результаты.** Анализ возможностей аналитических моделей для решения задачи *FSI*. Аналитические модели для исследования течения жидкости в кориолисовых расходомерах использовали многие авторы [1, 16-22]. Cheesewright, Belhadj, Clark [16-18] исследовали влияние внешних вибраций работающего оборудования и пульсаций потока на точность измерения массового расхода жидкости и представили аналитические решения, позволяющие их учесть. Авторы [18] показали, что внешние вибрации на частоте источника колебаний расходомера вызывают ошибку измерения прибора независимо от алгоритма определения фазы. Результаты исследований авторов [1, 19-20] позволили оценить погрешности измерения, вызываемые внешней вибрацией, погрешности по температуре и технологическому давлению, а также методы их коррекции.

Kazahaya [1] разработал обобщенную модель кориолисова расходомера, учитывающую различные конструкции измерительных трубок расходомера. Для двухтрубного кориолисова расходомера аналитическая модель представлена уравнением:

$$M = \frac{8EI}{l^3} \frac{1}{\omega} \tan(\varphi) = \frac{4EI}{\pi l^3 f} \tan(\varphi), \quad (1)$$

где  $M$  – массовый расход,  $E$  – модуль Юнга,  $I$  – момент инерции,  $l$  – расстояние до датчиков,  $\omega$  – угловая скорость,  $f$  – частота колебаний,  $\varphi$  – отклонение расходомерной трубки.

Для однотрубного кориолисова расходомера им предложено уравнение:

$$M = \frac{2EI}{\pi l^3 f} \tan(\varphi). \quad (2)$$

Так как модуль Юнга  $E$  неизменен при постоянной температуре, а момент инерции  $I$  определяется внутренним и внешним радиусами трубки, значение  $K$  постоянно для каждого кориолисова расходомера:

$$\frac{4EI}{\pi l^3} \equiv K. \quad (3)$$

На основе этих уравнений автор дал рекомендации по усовершенствованию характеристик расходомеров, способов их производства, и предложил уравнение температурной коррекции:

$$K = \frac{E_0}{l_0^3} (r_{o0}^4 - r_{i0}^4) \{1 + (\varepsilon + \alpha)(T - 20)\} = K_0 \{1 + (\varepsilon + \alpha)(T - 20)\}, \quad (4)$$

где  $r_{o0}$  – внешний радиус трубки с учетом температурной деформации,  $r_{i0}$  – внутренний радиус трубки с учетом температурной деформации,  $T$  – температура жидкости (= температуре трубки) в °C;  $\varepsilon$

– тепловой коэффициент модуля Юнга;  $\alpha$  – тепловой коэффициент расширения.

Он также отметил, что влияние технологического давления в трубопроводе малого сечения не сказывается на работу кориолисовых расходомеров с небольшими расходомерными трубками (диаметр 13,36 мм и толщина стенки 1,65 мм), поэтому не требуется компенсации давления до 10 Мпа. Погрешность измерения составляет при этом 0,05%. Напротив, в приборах, работающих в трубах большого сечения, необходимо корректирование технологического давления для обеспечения точности измерения массового расхода жидкости.

Wang и соав. [19] предложили аналитическую модель системы «расходомерная трубка – жидкость» для произвольно изогнутых  $U$ -образных расходомерных трубок, позволяющую теоретически рассчитать относительное смещение в любой точке трубки. Она послужила основой для проектирования более эффективных форм расходомерных трубок, позволяющих усилить эффект силы Кориолиса, и для нахождения оптимальных мест размещения датчиков. Предложенное авторами решение позволяет выявить влияние модуля упругости материала трубки и момента инерции сечения измерительной трубки расходомера на чувствительность прибора. Расчеты на основе предложенной модели показали, что ошибка измерения составляет около 1%. Авторы сформулировали основные причины появления ошибок в модели: игнорирование взаимодействия жидкости с расходомерной трубкой, упрощение конструкции трубки при расчете дополнительного крутящего момента от источника колебаний, предположение о нулевом смещении расходомерной трубки в расчетный момент времени.

Zheng и соав. [20] также предложили аналитическую модель для оценки чувствительности измерения расхода жидкости в кориолисовых расходомерах с  $U$ -образной трубкой:

$$K = \frac{\Delta t}{Q_m} = \frac{4}{E I l} \left\{ \frac{1}{2} l^2 \left[ \bar{X}_1 (b \cos \alpha + R \sin \alpha) + \bar{X}_2 \sin \alpha + \frac{1}{2} R^2 (\sin \alpha - \alpha \cos \alpha) \right] + \frac{1}{3} l^3 \left[ \bar{X}_1 + R(1 - \cos \alpha) + \frac{1}{8} l^4 \sin \alpha \right] \right\}, \quad (5)$$

где  $Q_m$  – массовый расход,  $\Delta t$  – разница во времени,  $l$  – длина трубки,  $E$  – модуль упругости,  $I$  – момент инерции,  $R$  – радиус скругления трубки,  $\bar{X}_1$  – приращение правой половины трубки,  $\bar{X}_2$  – приращение левой половины трубки,  $\alpha$  – угол скругления трубки.

Авторы [9, 21, 22] представили аналитические аппроксимации основных характеристик расходомера, в которых вариации собственной частоты и разности во времени использованы для измерения плотности жидкости и ее массового расхода. Kutin и Bajsic [9] разработали математическую модель, использующую метод Галеркина, на основе линейной суперпозиции нескольких модальных функций. Аналитические аппроксимации характеристик расходомера получали путем разложения в ряд Тейлора. В предложенном

авторами уравнении движения жидкости в начале расчета влияние осевой силы, добавленных масс, демпфирования и возбуждения не учитывались:

$$\frac{\partial^4 \eta}{\partial \xi^4} + \beta v^2 \frac{\partial^2 \eta}{\partial \xi^2} + 2\beta v \frac{\partial^2 \eta}{\partial \xi \partial \tau} + (1 + \beta) \frac{\partial^2 \eta}{\partial \tau^2} = 0 \quad (6)$$

Далее уравнение усложнялось, и поочередно исследовались влияние осевой силы, добавленных масс, демпфирования и возбуждения на точность измерения массового расхода.

Raszillier и Durst [21] вывели зависимость временной задержки между ответными сигналами от двух датчиков и массовым расходом жидкости. Поскольку авторы не учитывали термические напряжения в стенках трубки, возникающие вследствие значительного перепада температур, и механические напряжения, возникающие в результате перепада наружного и внутреннего давления, модель ограничена для практического применения.

Ford [22] предложил модель прамотрубного кориолисового расходомера, в которой результаты моделирования сведены к уравнениям, позволяющим оценить чувствительность системы «расходомерная трубка – жидкость» к внешним воздействиям по трем параметрам:

$$\tau \approx \frac{(2.05x l^2 - 0.2x^3) M}{93.33 E_S I_S \sqrt{0.767 + R + 0.696 R^2}} \quad (7)$$

где  $\tau$  – временная задержка между датчиками,  $x$  – локальная осевая координата,  $l$  – длина измерительной трубы,  $E_S$  – модуль Юнга материала трубы,  $I_S$  – момент инерции трубы,  $R$  – близость к пределу потери устойчивости Эйлера (безразмерная).

$$F_n \approx \frac{177 R^{0.48}}{50 l^2} \left( \frac{E_S I_S}{m} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

где  $F_n$  – собственная частота колебаний,  $m$  – комбинированная масса жидкости и трубы на единицу длины.

$$\bar{R} = 1 + \frac{l^2 (\Gamma - p A_f)}{4\pi^2 E_S I_S} \quad (9)$$

где  $\Gamma$  – общая растягивающая сила,  $p$  – давление жидкости,  $A_f$  – площадь поперечного сечения жидкости (площадь потока).

Предложенные уравнения [22] позволяют учитывать движение расходомерной трубки, однако влияние массы датчиков, закрепленных на трубке, и источника колебаний в них не учтено. Модель проверена на практике, разница между экспериментальными и расчетными данными составила от 2% до 5%.

Таким образом, анализ существующих аналитических моделей показал, что они позволяют определить временную задержку между сигналами датчиков расходомера, вычислить массовый расход, установить влияние температуры, давления жидкости на точность измерения массового расхода. Однако, физическая картина взаимодействия колеблющейся расходомерной трубки с протекающим через нее потоком жидкости в аналитических моделях сильно упрощена.

Анализ возможностей численных моделей для решения задачи FSI. Sultan и Nemp [8] одними

из первых использовали численный подход для *ID*-моделирования системы «расходомерная трубка – жидкость» и подтвердили результаты расчетов экспериментальными данными на примере воды. Расходомерная трубка описывалась вибрирующими балками Эйлера, взаимодействующими с одномерным потоком жидкости.

В более поздних *ID*-моделях расходомерная трубка рассматривалась как балка Эйлера – Бернулли [9-11] или балка Тимошенко [13-16], а течение жидкости в ней моделировалось как одномерное течение с постоянной скоростью [2].

Бобовник и др. [11] впервые использовали *CFD* (*Computational Fluid Dynamics*) для моделирования движения жидкости в прямолинейной расходомерной трубке. Для этого на каждом временном шаге задавалось отклонение трубки, а для оценки чувствительности модели расходомера использовался дополнительный крутящий момент от источника колебаний.

Однако, применение *ID*-моделей ограничено простыми конфигурациями расходомерной трубки, и не позволяет исследовать влияние различных характеристик потока на выходной сигнал расходомера [23]. Численные *ID*-модели, также, как и аналитические, используют слабосвязные алгоритмы сопряжения между решением задачи гидродинамики и задачи механики твердого тела и не учитывают итеративное взаимное влияние протекающего потока на расходомерную трубку и движение самой трубки [24]. Между тем движение расходомерной трубки воздействует на поле скорости потока жидкости, которое, в свою очередь, также влияет на движение трубки. Для учета этого влияния необходимы итерационные модели *FSI* с «двусторонней связью» [24].

Впервые такую модель предложили Bobovnik и соавт. [26], которые на основании раздельного численного подхода рассмотрели взаимодействие жидкости с конструкцией в прямой измерительной трубе кориолисова расходомера и оценили влияние профиля скорости на точность работы расходомера. Авторы использовали комбинацию метода конечного объема *FVM* (*Finite-Volume Method*) для описания движения потока жидкости и метода конечных элементов *FEM* (*Finite-Element Method*) для моделирования конструкции трубки. Течение потока описывалось уравнениями Навье-Стокса, усредненными по Рейнольдсу (*RANS*), а расходомерная трубка моделировалась как оболочечная структура [23]. Авторы использовали этот подход, чтобы найти собственные частоты и разность фаз в прямотрубном кориолисовом расходомере.

Позже [27] они расширили численную модель [26] для учета вынужденных вибраций расходомерной трубки при различных скоростях потока, а затем [28] для изучения влияния ошибок монтажа кориолисового расходомера на точность его показаний.

Численную модель [26] использовали другие

исследователи для изучения влияния потока жидкости на точность показаний кориолисовых расходомеров. Enz [29] изучал зависимость временного сдвига от профиля скорости путем моделирования на основе данной модели. Kumar и соав. [30] исследовали влияние потоков жидкости с малыми числами Рейнольдса на работу кориолисовых расходомеров с использованием разделенной модели *FSI*.

Романов и Бескачко [31] с помощью технологии *FSI* проводили *3D*-моделирование колебаний трубки расходомера для идеальной жидкости. Выявлено, что величина фазового сдвига, регистрируемая расходомером, зависит как от распределения гироскопических сил, так и от связанности колебательной и информационной подсистемы возбуждения. Рассмотрены различные формы расходомерных трубок и для каждой из них установлена зависимость распределения фазового сдвига от перемещения датчиковой аппаратуры по длине трубки. Отмечено, что оптимизация формы расходомерной трубки по критерию максимальности фазового сдвига ограничена взаимным влиянием колебательной системы расходомера и системой детектирования данных.

Яушев и соав. [32] на основе метода конечных элементов предложили модель расходомера, позволяющую оценить влияние изменений его размеров и плотности рабочей среды на рабочую частоту прибора. С помощью численных расчетов и экспериментальным путем определены формы колебаний кориолисова расходомера, которые затем были подтверждены модальными испытаниями.

В следующей своей работе [33] они выявили влияние на стабильность нуля упругодемпфирующих свойств, закрепленного двухтрубного кориолисового расходомера. Установлено, что на величину смещения нуля оказывают совместное влияние три фактора: наличие вблизи рабочей частоты одной из собственных частот системы «кориолисов расходомер – трубопроводы»; величина демпфирования и дисбаланс двух измерительных трубок. Выявлено, что при сближении собственной частоты системы «кориолисов расходомер – трубопроводы» с рабочей частотой прибора разность фаз колебаний двух измерительных трубок менялась на порядок больше, чем влияние смещения нуля. В связи с этим ее предложено использовать при диагностике смещения нуля, вызванного влиянием условий закрепления.

Кроме метода конечных объемов *FVM* для численного моделирования гидродинамики потока жидкости в расходомере используют также метод решеток Больцмана *LBM* (*Lattice Boltzmann Method*) [34, 35]. Высокоэффективный параллельный алгоритм этого метода, возможность применения к разным режимам гидродинамики потока и различным конструкциям расходомерной трубки представляют большие возможности для исследования влияния различных параметров на работу кориолисовых расходомеров.

Последние публикации [5, 23, 26] по численному моделированию кориолисовых расходомеров направлены поиск единых методологий моделирования, повышение точности и экспериментальное подтверждение результатов.

В исследовании [36] проанализированы характеристики расходомера Кориолиса с использованием *CFD*-моделирования, основанного на итеративном двустороннем *FSI* анализе и экспериментальных измерениях.

Авторы [23] отметили, что до сих пор нет единого мнения о выборе модели турбулентности для моделирования работы *U*-образной или омега-образной трубок расходомера. Сравнение различных моделей турбулентности показало, что базовая модель напряжений Рейнольдса (*RSM*) обеспечивает более высокую точность по сравнению с моделью турбулентности сдвигового напряжения на основе вихревой вязкости (*SST*), поскольку *RSM* более точно отражает кривизну потока. Авторы пришли к выводу, что при исследованиях необходимо учитывать массу датчиков, способ крепления расходомерной трубки, кроме того, следует отказаться от концепции эквивалентной длины трубки [23].

В работе [25] представлен обзор литературы, посвященный моделям *FSI* различных систем трубопроводов. Однако из 187 рассмотренных работ только 7 имеют практическое применение. Сделан вывод [5], что для создания более точных и востребованных моделей *FSI* необходимо параллельно проводить их экспериментальную проверку на находящихся в эксплуатации кориолисовых расходомерах.

**Обсуждение.** Приведенные выше результаты показывают, что аналитические модели позволяют более точно рассчитать временную задержку между сигналами датчиков расходомера, и вычислить массовый расход. Кроме того, они позволяют установить зависимости влияния конкретных факторов (температуры, давления жидкости и пр.) на точность измерения массового расхода. Однако, из-за того, что взаимное влияние жидкости и расходомерной трубки в аналитических моделях сильно упрощено, с помощью аналитических моделей нельзя учесть все факторы, оказывающие влияние на точность измерения.

Численное моделирование более перспективно для изучения влияния гидродинамики потока на работу кориолисовых расходомеров. Различают два подхода при численном моделировании *FSI*.

В первом подходе используют модели *FSI*, основанные на теории балок или оболочек и *ID*-модели жидкой среды, со слабосвязными алгоритмами сопряжения подзадач.

Второй подход основан на применении двусторонней итеративной *FSI*-модели с жесткосвязными алгоритмами сопряжения модели расходомерной трубки (*FEM*) и *3D*-модели жидкой среды (*CFD*).

В первом случае расходомеры исследуют путем

разработки моделей с более низкой точностью и рядом допущений [5]. Такие модели неприменимы для сложных конструкций расходомерной трубки, кроме того они не позволяют исследовать влияние характеристик потока на выходной сигнал расходомера.

Общим недостатком подходов со слабосвязными алгоритмами сопряжения является то, что они не позволяют определять собственные частоты, зависящие от геометрии трубки, свойств материала и не учитывают взаимодействие в системе «расходомерная трубка – жидкость», что приводит к отклонениям в моделируемом поведении системы от реальности [5].

Во втором случае проводят *3D*-моделирование на основе совместного использования метода конечного объема для описания движения потока жидкости и метода конечных элементов *FEM* для моделирования конструкции трубки. Такой подход позволяет достичь более высокой точности.

Таким образом, для исследования задачи *FSI* на практике, т.е. для улучшения точности кориолисовых расходомеров, находящихся в эксплуатации, рекомендуется использовать двусторонние итеративные *FSI*-модели с жесткосвязными алгоритмами сопряжения модели расходомерной трубки (*FEM*) и *3D*-модели жидкой среды (*CFD*). При этом в качестве базовой модели турбулентности использовать *RSM*-модель.

К ограничениям данных моделей можно отнести высокую стоимость и сложность вычисления на отдельных вычислительных машинах, поэтому применение алгоритмов высокоточных численных моделей для компенсации погрешностей расходомера на месте эксплуатации в режиме реального времени, в настоящее время затруднительно ввиду высоких вычислительных и временных затрат.

**Выводы.** На основании сравнительного анализа результатов моделирования процессов, протекающих в системе «расходомерная трубка – жидкость» в кориолисовых расходомерах установлено, что аналитические модели позволяют выявить влияние температуры, давления и пульсации потока на точность измерения массового расхода в кориолисовых расходомерах, а также получать упрощенные модели описываемой системы без специального программного обеспечения. Возможность применения аналитических моделей ограничена простой формой расходомерной трубки и строго ограниченной областью применимости.

Численные методы моделирования системы «расходомерная трубка – жидкость» *FSI* с жесткосвязным алгоритмом сопряжения позволяют проводить оценку конструкции расходомера, а именно определять точки установки датчиков и источника колебаний, выявлять участки возникновения турбулентности, рассчитывать опарафинивание трубки и его влияние на скорость протекания жидкости, рассчитывать амплитуду и частоту колебаний в зависимости от формы расходомерной трубки и др.

Возможность применения численных 3D-моделей ограничена высокими вычислительными и временными затратами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Kazahaya M. A mathematical model and error analysis of Coriolis mass flowmeters // IEEE Trans. Instrum. Meas. 2010. № 60. P. 1163-1174. DOI: 10.1109/TIM.2010.2086691.
2. Романов В.А., Тараненко П.А. Оценка диссипативных свойств колебательной системы серийного образца расходомера Кориолиса // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2020. № 2. С. 134-144. DOI: 10.15593/pern.mech/2020.2.11.
3. Кузьмин И.М., Тонков Л. Е. Распределенные вычисления в сопряженных задачах взаимодействия течений газа и многих деформируемых тел // Известия Института математики и информатики Удмуртского государственного университета. 2020. Т. 56. С. 30-40. DOI: 10.20537/2076-7633-2014-6-1-79-97.
4. Копысов С.П., Кузьмин И.М., Неодождогин Н.С., Новиков А.К., Рычков В.Н., Тонков Л.Е. Квазиьютоновский метод для неявного связывания сопряженных задач FSI. Химическая физика и мезоскопия. 2015. Т. 17. №4. С. 523-530.
5. Birjandi A.K., Sh. Shayegan, K.-U. Bletzinger, R. Wüchner. Development of a high-fidelity partitioned Fluid-Structure Interaction model of an Omega-shaped Coriolis Mass Meter and comparison with experimental data. Journal of Fluids and Structures. 2022. V. 110. 103510. DOI:10.1016/j.jfluidstructs.2022.103510.
6. Hon A. Numerical methods for fluid-structure interaction – a review. Commun. Comput. Phys. 2012. № 12. P. 337-377. DOI:10.4208/cicp.291210.290411s.
7. Degroote J., Bathe, K.J., Vierendeels, J. Performance of a new partitioned procedure versus a monolithic procedure in fluid-structure interaction. Comput. Struct. 2009. № 87. P. 793-801. DOI:10.1016/j.compstruc.2008.11.013.
8. Sultan G., Hemp J. Modelling of the Coriolis mass flowmeter // Journal of Sound and Vibration. – 1989. – V. 132 (3). – P. 473-489.
9. Kutin J.; Bajsi'c I. An analytical estimation of the Coriolis meter's characteristics based on modal superposition. Flow Meas. Instrum. 2002. № 12. P. 345-351
10. Guirguis Samer, ShangChun Fan, Modeling of Coriolis mass flow meter of a general plane-shape pipe, Flow Meas. Instrum. 2010. V. 21 (1). P. 40-47. DOI:10.1016/j.flowmeasinst.2009.11.004.
11. Bobovnik G., Kutin J., Bajsi'c I. The effect of flow conditions on the sensitivity of the coriolis flowmeter. Flow Meas. Instrum. 2004. V. 15. P. 69-76. DOI:10.1016/j.flowmeasinst.2003.12.001.
12. Stack C.P. Design and Analysis of Coriolis Mass Flowmeters using MSC/NASTRAN / C.P. Stack //Conf. on MSC World Users., 1993. P. 1-17.
13. Stack C.P. A finite element for the vibration analysis of a fluid-conveying Timoshenko beam / C.P. Stack, R.B. Garnett, G.E. Pawlas // Proceedings of the 34th AIAA/ASME structures, structural Dynamics and Material Conference. 1993. V. 4. P. 2120-2129.
14. Wang T., Baker R.C. An advanced numerical model for single straight tube Coriolis flowmeters // Journal of Fluids Engineering. 2006. Vol. 128. I. 6. P.1346-1350. DOI:10.1115/1.2353266.
15. Ruoff J., Hodapp M., Kück H. Finite element modelling of Coriolis mass flowmeters with arbitrary pipe geometry and unsteady flow conditions // Flow Measurement and Instrumentation. 2014. V. 37. P. 119-126. DOI:10.1016/J.FLOWMEASINST.2014.03.010.
16. Belhadj A., Cheesewright R., Clark C. The simulation of Coriolis meter response to pulsating flow using a general purpose feode. J. Fluids Struct. 2000. № 14. P. 613-634.
17. Cheesewright R., Clark C. The effect of flow pulsations on Coriolis mass flow meters. J. Fluids Struct. 1998. № 12. P. 1025-1039.
18. Cheesewright R., Belhadj A., Clark C. Effect of mechanical vibrations on Coriolis mass flow meters, J. Dyn. Syst. Meas. Contr. 2003. 125(1). DOI:10.1115/1.1539098.
19. Wang L.J., Hu L., Zhu Z.C., Ye P., Fu X. Analytical calculation of sensitivity for Coriolis mass flowmeter. 2011. № 44. P. 1117-1127. DOI:10.1016/j.measurement.2011.03.011.
20. Zheng D., Wang S., Bei, L., Fan S. Theoretical analysis and experimental study of Coriolis mass flow sensor sensitivity. Journal of Fluids and Structures. 2016. № 65. P. 295-312. 10.1016/j.jfluidstructs.2016.06.004.
21. Raszillier H., Durst F. Coriolis-effect in mass flow metering, Arch. Appl. Mech. 1991. 61 (3). P. 192-214.
22. Ford C.L. A simple parametric design model for straight-tube Coriolis flow meters, Flow Measurement and Instrumentation. 2021. V. 79. 101958. DOI:10.1016/j.flowmeasinst.2021.101958.
23. Shavrina E., Nguyen V.-T., YanZ., Khoo B.C. Fluid-Solid Interaction Simulation Methodology for Coriolis Flowmeter Operation Analysis. Sensors. 2021. № 21. 8105. DOI:10.3390/s21238105.
24. Wang T., Baker R. Coriolis flowmeters: a review of developments over the past 20 years, and an assessment of the state of the art and likely future directions // Flow Measurement and Instrumentation. 2014. V. 40. P. 99-123. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2014.08.015.
25. Li S., Karney, B.W., Liu, G. Fsi research in pipeline systems-a review of the literature. J. Fluids Struct. 2015. 57. P. 277-297. DOI:10.1016/j.jfluidstructs.2015.06.020.
26. Bobovnik G., Mole N., Kutin J., Štok B., Bajsi'c, I. Coupled finite-volume/finite-element modelling of the straight-tube Coriolis flowmeter. J. Fluids Struct. 2005. 20. P. 785-800. DOI:10.1016/j.jfluidstructs.2005.04.008.
27. Mole, N., Bobovnik, G., Kutin, J., Štok, B., Bajsi'c, I. An improved three-dimensional coupled fluid-structure model for Coriolis flowmeters. J. Fluids Struct. 2008. 24. P. 559-575. DOI:10.1016/j.jfluidstructs.2007.10.004.
28. Bobovnik G., Kutin J., Mole N., Štok B., Bajsi'c I. Numerical analysis of installation effects in Coriolis flowmeters: A case study of a short straight tube full-bore design, Flow Measurement and Instrumentation. 2013. V. 34. P. 142-150. DOI:10.1016/j.flowmeasinst.2013.10.004
29. Enz S. Factors Affecting Coriolis Flowmeter Accuracy, Precision, and Robustness. Kgs. Lyngby, Denmark: Technical University of Denmark, 2010. 210 p. (DCAMM Special Report; No. S119).
30. Kumar V., Anklin M., Schwenter B. Fluid-Structure Interaction (FSI) Simulations on the Sensitivity of Coriolis FlowMeter Under Low Reynolds Number Flows //Proceedings of the 15th Flow Measurement Conference (FLOMEKO), Taipei, Taiwan. 2010. P. 13-15.
31. Романов В.А., Бескачко В.П. Идентификация гирокорических сил в колебательной системе расходомера Кориолиса // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2021. № 3. С. 129-140. DOI: 10.15593/pern.mech/2021.3.12
32. Yaushev A.A., Taranenko P.A., Loginovskiy V.A. Study of the oscillation modes of a Coriolis flowmeter using a parametric finite element model, verified by the results of modal testing, Procedia Eng. 2016. 150. P. 336-340. DOI:10.1016/j.proeng.2016.07.027.
33. Яушев А.А. Расчетно-экспериментальное исследование стабильности нуля кориолисового расходомера в зависимости от упругодемпфирующих свойств закрепления / А.А. Яушев, П.А. Тараненко //Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2019. Т. 19. № 1. С.47-55. DOI: 10.14529/engin190105.
34. Haussmann M., Reinshaus P., Simonis S., Nirschl H., Krause M.J. Fluid-Structure Interaction Simulation of a Coriolis Mass Flowmeter Using a Lattice Boltzmann Method. Fluids. 2021. № 6. P. 167. DOI:10.3390/fluids6040167
35. Krause M.J., et al. OpenLB – Open source lattice Boltzmann code, Computers & Mathematics with Applications. 2021. V.81. P.258-288. DOI:10.1016/j.camwa.2020.04.033.
36. Gace D.A. On the performance of a Coriolis Mass Flowmeter (CMF): experimental measurement and FSI simulation. Int. J. Metrol. Qual. Eng. 2022. V.13. id.3. P.15. DOI: 10.1051/ijmqe/2022002.

Статья поступила в редакцию 01.08.2022

Статья принята к публикации 16.09.2022

УДК 658.1.334.7

DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0010

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ УПРАВЛЕНИЯ В ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ ОБОРОННО-ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

© Авторы 2022

SPIN-код: 5014-4683

AuthorID: 269105

ORCID: 0000-0003-0579-0278

**БАРДУЛИН Евгений Николаевич**, доктор экономических наук, профессор,  
заведующий кафедрой управления и экономики

*Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России имени героя Российской Федерации Е.Н. Зиничева  
(196105, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр-т 149, email: bardulin@mail.ru)*

SPIN-код: 1839-9620

AuthorID: 1145209

ORCID: 0000-0002-5804-3420

**ЗИНЕНКО Артем Сергеевич**, адъюнкт кафедры управления и экономики

*Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России имени героя Российской Федерации Е.Н. Зиничева  
(196105, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр-т 149, email: artem.ppc62@gmail.com)*

**Аннотация.** Статья посвящена анализу современных тенденций в области управления в организационных системах. За основу взято функционирование сложной экономической системы оборонно-промышленного комплекса (ОПК) Российской Федерации. Представлены основные характеристики комплекса оборонных предприятий как сложной системы, главной целью которой является удовлетворение потребностей государства в вооружениях, военной и специальной технике (ВВСТ). Несмотря на роль и место ОПК в обеспечении национальной безопасности страны существуют определенные негативные факторы, мешающие стабильному развитию этого сектора экономики. В статье проанализированы основные блоки взаимосвязанных субъектов управления ОПК, отражены основные аспекты, определяющие состояние равновесия системы ОПК. Дана характеристика основных компонентов цикла управленческой деятельности, таких как: организация, стимулирование, контроль и планирование с учетом специфических условий хозяйственной деятельности предприятий ОПК. Проведенный анализ позволил сделать вывод о необходимости разработки современного инструментария в области управления, планирования и контроля в целях обеспечения развития отечественного ОПК. Учитывая, что ОПК является самым высокотехнологичным сектором народного хозяйства и важнейшим политическим инструментом, задача его развития становится одной из самых приоритетных в современном мире.

**Ключевые слова:** система, управление, оборонно-промышленный комплекс (ОПК), контроль, субъект управления, мониторинг, планирование, стратегическое управление.

## THEORETICAL ASPECTS OF MANAGEMENT IN ORGANIZATIONAL SYSTEMS OF THE DEFENSE INDUSTRIAL COMPLEX

© Authors 2022

**BARDULIN Evgeny Nikolaevich**, doctor of economics, professor,  
head of the Department of Management and Economics

**ZINENKO Artem Sergeevich**, phd student of the Department of Management and Economics  
*Saint Petersburg University of the Ministry of Emergency Situations of Russia  
named after the Hero of the Russian Federation E.N. Zinichev*

*(196105, Russia, St. Petersburg, Moskovsky pr. 149, emails: bardulin@mail.ru, artem.ppc62@gmail.com)*

**Abstract.** The article is devoted to the analysis of modern trends in the field of management in organizational systems. The functioning of the complex economic system of the military-industrial complex (MIC) of the Russian Federation is taken as a basis. The main characteristics of the complex of defense enterprises as a complex system, the main purpose of which is to meet the needs of the state in armaments, military and special equipment (VVST), are presented. Despite the role and place of the defense industry in ensuring the national security of the country, there are certain negative aspects that hinder the stable development of this sector of the economy. The article analyzes the main blocks of interrelated subjects of the defense industry management, reflects the main aspects that determine the state of the balance of the defense industry system. The characteristics of the main components of the cycle of management activities, such as: organization, stimulation, control and planning, taking into account the specific conditions of the economic activity of defense enterprises, are given. The analysis made it possible to conclude that it is necessary to develop modern tools in the field of management, planning and control in order to ensure the development of the domestic defense industry. Considering that the defense industry is the most high-tech sector of the national economy and the most important political tool, the task of its development becomes one of the highest priorities in the modern world.

**Keywords:** system, management, military-industrial complex (MIC), control, subject of management, monitoring,

planning, strategic management.

*Для цитирования:* Бардулин Е.Н. Теоретические аспекты управления в организационных системах оборонно-промышленного комплекса / Е.Н. Бардулин, А.С. Зиненко // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022. – Т. 11. – № 3(59). – С. 64-68. – DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0010.

**Введение.** В теории управления в организационных системах последние понимаются как объединение людей, совместно реализующих определенную программу для достижения поставленной цели и действующих в рамках четко оформленных механизмов функционирования [1]. Иными словами, такие системы рассматриваются как организационная совокупность различных элементов, которой присущ набор характерных признаков.

При этом все системы можно разделить на простые и сложные. Учитывая существующие методологические подходы, ученые по-разному определяют принадлежность тех или иных систем. С одной стороны, сложность системы подразумевает, что результат ее функционирования невозможно задать заранее (хотя бы на уровне вероятности) вне зависимости от причин такой неопределенности: внешних или внутренних [2]. Некоторые исследователи определяют сложную систему как систему, поведение которой крайне сложно смоделировать по причине наличия сложных взаимодействий между частями системы или системы и окружающей среды [3].

**Методология.** Целью данной статьи является анализ современных тенденций в области управления в организационных системах на примере функционирования экономической системы оборонно-промышленного комплекса (ОПК) Российской Федерации. Объект исследования – управление ОПК.

**Результаты.** Оборонно-промышленный комплекс, безусловно, является сложной системой, что обусловлено большим количеством функционирующих элементов и крайне специфическим характером их взаимодействия как внутри системы, так и с внешней средой.

Как систему экономических отношений, главной целью которой является удовлетворение нужд государства в вооружении, военной и специальной технике ОПК характеризует взаимосвязь нескольких субъектов:

- органы государственной власти;
- промышленные предприятия;
- научные организации, конструкторские бюро, занимающиеся исследованиями в области обороны [4].

Предприятия ОПК на региональном уровне выступают в роли градообразующих, во многом задавая тон развитию субъектов Федерации. В 2021 году, по данным Минпромторга РФ, в сфере деятельности которого находится более 80% предприятий ОПК, в сводный реестр включены 1281 организация с числом занятых около 2 млн. человек [5].

ОПК в целом является частью российской

экономики, занимает ключевое положение в обеспечении национальной безопасности страны и является фундаментом ее военной мощи. ОПК представляет собой устойчивую систему производственных, научно-исследовательских и испытательных предприятий, в сфере деятельности которой находится разработка и производство вооружений, военной и специальной техники, экипировки и амуниции, боеприпасов для обеспечения силовых структур государства и экспортных поставок, а также выпуск продукции гражданского назначения в рамках диверсификации производства [6]. Функционирование оборонных предприятий оказывает непосредственное влияние на состояние всей отечественной экономики, закладывает фундамент ее развития. Исторически сложилось, что ОПК является главным носителем научно-технического потенциала российской экономики. В силу объективных причин технологические, кадровые и мобилизационные возможности предприятий оборонного сектора значительно выше, чем в других обрабатывающих отраслях [6-8].

По мере развития глобальной экономики, роста технологических возможностей общественного производства, расширения спектра социально-экономических потребностей перманентно увеличиваются количественные и качественные параметры, оказывающие влияние на функционирование предприятий ОПК, получение конечных результатов предпринимательской деятельности. К таковым, прежде всего, следует отнести:

- инновационная политика предприятия (затраты на НИОКР, создание конкурентоспособной продукции);
- функционирование эффективных бизнес-процессов (применение научно обоснованных методов управления и организации трудовой деятельности, маркетинг, управление проектами в организации, планирование);
- наличие уникальных технологий, которые недоступны конкурентам;
- наличие квалифицированного персонала, который сложно найти на рынке и на подготовку которого требуется продолжительное время. От персонала зависит экономическая устойчивость и стабильность предприятия на рынке.

Несмотря на стратегическое значение предприятий ОПК в их работе существует ряд системных проблем и барьеров, препятствующих эффективному развитию. Это, прежде всего, сокращение объемов государственного оборонного заказа (ГОЗ), который является основным источником формирования производственной деятельности оборонного секто-

ра, недостаточное финансирование перспективных разработок, невысокий уровень инновационной активности, необходимость повышения конкурентоспособности, барьеры в дистрибуции, организационные барьеры (преобладание узкокорпоративных целей над системными, жесткие организационные структуры, межотраслевые противоречия) и др. [9]. Все вышеперечисленное оказывает существенное влияние как на качество выпускаемой продукции, так и на состояние защищенности государства. В связи с этим объективно назрела необходимость разработки новых инструментов и методов в области управления, планирования и контроля в целях обеспечения стабильного развития ОПК [10].

Формирование государственного заказа позволяет обеспечить необходимый уровень загрузки производственных мощностей предприятия ОПК, а также, что не менее важно, дает возможность управленческому звену осуществить детальное прогнозирование и планирование хозяйственной деятельности, что потенциально способно привести к максимальному снижению рисков и обеспечению выполнения поставленных целей [11]. Взаимодействие элементов системы ОПК происходит на всех этапах – от разработки ГОЗ до утилизации, вышедших из строя или устаревших ВВСТ.

Выполнение контрактов по ГОЗ имеет директивно-плановый характер, при котором работы в долгосрочном периоде выполняются в рамках вертикальной организации производства, включающей в себя большое количество исполнителей. При этом действие каждого субъекта имеет четко определенные сроки и размеры оплаты, что контролируется рядом уполномоченных органов государственной власти.

В условиях сложной социально-экономической системы ОПК необходимо не избегать рисков (что зачастую и невозможно), а, наоборот, предвидеть их, стараться минимизировать. Такая работа требует своевременного обнаружения, выявления возможных угроз и рисков, потенциального результата их воздействия на функционирование всего комплекса оборонных предприятий для своевременной подготовки и принятия управленческих решений по снижению их влияния [12-13].

С точки зрения управления крайне важно определить характерные черты сложной экономической системы ОПК [14]:

- комплекс предприятий ОПК является интеллектуальной системой, которой присуща склонность к самообучению;
- для ОПК возможно изменение целей системы, что напрямую зависит от внешних условий (политика государства, рыночная конъюнктура);
- система предприятий ОПК является комплексной. При этом функционирование ее элементов носит преимущественно неавтономный характер, что обуславливает тесное взаимодействие с окружающей средой;
- элементами системы выступают люди и

материальные ценности;

- функционирование системы осуществляется для получения прибыли/покрытия издержек.

Кроме того, следует отметить, что исторические и экономические аспекты развития отечественного ОПК определяют тесное взаимодействие системы управления оборонными предприятиями с силовыми структурами государства, финансовыми, бюджетными, научными, образовательными организациями. В этой связи структуру управления ОПК целесообразно представить в виде трех блоков: силового, финансово-экономического и промышленного [15].

Так, основной задачей в рамках силового блока (Министерство обороны, МЧС, МВД и др.) является укрепление обороноспособности страны, обеспечение национальной безопасности и поддержание внутреннего правопорядка. С этой стороны основным инструментом управления выступает ГОЗ, который формирует спрос государства на продукцию оборонного назначения. В рамках финансово-экономического блока (Министерство финансов, Министерство экономического развития) решаются задачи по поддержанию стабильности и финансовой устойчивости предприятий ОПК, контролю за расходованием бюджетных средств. Основные вопросы инвестиционной политики и развития производственной базы решаются в рамках промышленного блока управления, осуществляемого Министерством промышленности и торговли.

Главная задача управления заключается в обеспечении устойчивого равновесия предприятий, на основе которого достигаются системность и целостность всего ОПК. Подсистемы управления путем реализации мониторинга и контрольных мероприятий осуществляют систематизацию и упорядоченность отношений между комплексом оборонных производств. При этом ключевыми аспектами такого равновесия выступают:

- финансовая устойчивость (обеспечение достаточного уровня текущей и долгосрочной ликвидности, платёжеспособность, поддержание уровня рентабельности и пр.[13]);
- информационное взаимодействие (формирование и поддержание стабильного механизма обмена информацией между органами государственной власти, промышленными предприятиями, контрольными органами, научными организациями);
- кадровое равновесие (квалификация работников, затраты на человеческий капитал, мониторинг психологического климата на предприятии, соблюдение норм трудового права и пр.);
- производственное равновесие (создание условий, позволяющих выполнять государственные контракты в срок с заданным уровнем издержек, проведение политики импортозамещения и пр.).

**Обсуждение.** В теории управления основными компонентами любого цикла управленческой деятельности являются организация, стимулирование, контроль, планирование [16]. При этом для каждой

отдельной организационной системы характерны специфические механизмы реализации указанных элементов. ОПК в силу современных тенденций развития в данном случае не является исключением.

В организационном аспекте в условиях постепенного расширения и диверсификации производства ключевым фактором становится децентрализация процесса управления, что становится основной линией развития организационных форм ОПК. Необходимо отметить, что процессы децентрализации и разделения производственных циклов напрямую связаны с планомерным переходом от линейно-функциональных к матричным и сетевым организационным структурам управления.

В контексте стимулирования особо важное значение приобретает присущий системе ОПК двойственный характер с точки зрения функционирования в рыночных условиях. С одной стороны, по сути, единственным покупателем оборонной продукции является государство. С этой стороны хозяйственная деятельность предприятий ОПК напрямую зависит от потребностей и нужд государственных структур, уровня бюджетного авансирования, доступности кредитных ресурсов, что достаточно сильно влияет на деловую активность. Однако, с другой стороны, активизация политики диверсификации производства предприятиями ОПК позволяет последним выступать в роли активных участников рыночных отношений, подверженных существующей конъюнктуре на рынке потребительских товаров. Указанный процесс диверсификации представляет собой повышение степени интеграции ОПК в структуру народного хозяйства, что позволяет решать большое количество стоящих перед отечественной экономикой задач [17].

Значительное место в функционировании ОПК занимает контроль, как внешний, так и внутренний. При этом, как справедливо отмечено в некоторых научных публикациях, зачастую в теории управления контрольные мероприятия представляют собой заключительную фазу всего процесса, что не совсем приемлемо, если речь идет о стратегическом контроле (контроле за выполнением стратегии предприятия) [18]. Очевидно, что с этой стороны контрольные процедуры осуществляются постоянно, охватывая весь процесс управления – от планирования и анализа текущего состояния предприятия до контроля реализации стратегии и внесения необходимых корректировок. В современном мире развитие экономики обуславливает необходимость поиска новых подходов к управлению, важнейшим инструментом которого становится стратегический менеджмент в управлении промышленным предприятием [19].

Необходимо отметить, что контрольные мероприятия имеют немаловажное значение и для оценки производственной эффективности с точки зрения качества выпускаемой продукции. На уровне предприятий контроль осуществляется корпоративными специалистами в соответствии с полномочиями (отделы контроля качества, исследо-

вательские лаборатории, подразделения главного конструктора и пр.). Однако при производстве ВВСТ определяющее значение приобретает внешний межведомственный контроль качества продукции. В рамках предоставленных полномочий и существующей законодательной базы контрольные мероприятия могут осуществляться представителями заказчиков – военными представителями [20].

**Выводы.** Подводя итог стоит отметить, что современный отечественный ОПК – достаточно крупный и крайне сложный по структуре комплекс, который тесно связан не только со смежными отраслями экономики, но и с различными органами управления со стороны органов государственной власти. Сегодня ОПК, имеющий определенную историческую специфику и прошедший различные этапы в своем развитии, занимает важнейшее место в обеспечении национальной безопасности Российской Федерации, обладает достаточно устойчивым положением на мировом рынке ВВСТ. При этом современная система управления ОПК, не имеющая, по сути, аналогов в отечественной практике и опыте зарубежных государств, постоянно требует новых решений и повышения квалификации. Дальнейшее развитие ОПК должно стать одним из главных приоритетов политики государства, по причине вовлеченности оборонных предприятий в национальную экономику и их роли в под-держании обороноспособности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Бурков В.А., Коргин Н.А., Новиков Д.А. Введение в теорию управления организационными системами: Учебник / Под ред. Д.А. Новикова. 2-ое изд. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2014 – 264 с.
2. Лисецкий Ю.М. Сложные системы // Программные продукты и системы. – 2005. – № 3. – С.1.
3. Цветков В.Я. Сложные технические системы // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 10-4. – С. 670.
4. Молодан И.В., Лихтер А.В. Институциональные аспекты управления предприятиями ОПК // Решетневские чтения. – 2015. – Т.2. – С. 358-360.
5. Минпромторг РФ. Развитие оборонно-промышленного комплекса в период 2008-2020 годов. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://minpromtorg.gov.ru/activities/industry/sis zadachi/oboronprom/#collapseOne> (дата обращения: 11.11.2021).
6. Хрусталев Е.Ю. Оборонно-промышленный комплекс России: предназначение, состояние и перспективы развития // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. – 2011. – Т.7. – № 35 (128). – С. 61-71.
7. Широ А.А., Гусев М.С., Фролов И.Э. Макроэкономические эффекты оборонных расходов России: ретроспективный анализ и прогноз // Проблемы прогнозирования. – 2018. – № 4 (169). – С. 3-16.
8. Бочуров А.А., Курбанов А.Х., Литвиненко А.Н. Вопросы экономической безопасности в оборонно-промышленном комплексе // Управленческое консультирование. – 2018. – № 3 (111). – С. 41-51.
9. Бардулин Е.Н. Программно-логистический подход к развитию оборонно-промышленного комплекса [Текст]: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. экон. наук / Бардулин Евгений Николаевич; Санкт-Петербургский университет экономики и финансов. – Санкт-Петербург, 2004.
10. Военкова В.Н.И. Основные направления планирования и управления на предприятиях оборонно-промышленного комплекса (ОПК) Российской Федерации // Евразийский союз ученых. – 2015. – № 10-3 (19). – С. 150-153.

11. Новицкий А.С., Бурак А.А. Совершенствование организации производства и управления предприятием ОПК в условиях диверсификации // В сборнике: Урал – драйвер неиндустриального и инновационного развития России. Материалы I Уральского экономического форума, в 2-х т. – 2019. – С. 146-149.

12. Бардулин Е.Н., Воронин С.В., Скрипник И.Л. Вопросы принятия управленческих решений в случае неопределенности и риска // Инновационное развитие. 2018. № 8 (25). С. 42-44.

13. Афанасьев М.В., Бабенков В.И., Бардулин Е.Н. Особенности выбора исполнителей государственного заказа в интересах военной организации государства с учётом оценки риска // Научный альманах. – 2018. – № 5-1 (43). – С. 30-33.

14. Батъковский М.А., Кравчук П.В. Общая характеристика системы интегрированного мониторинга управления развитием предприятия ОПК // Современные научные исследования и разработки. – 2017. – № 3 (11). – С. 45-50.

15. Горюнова А.А. О некоторых аспектах системы управления современным отечественным ОПК // В сборнике: Общество, человек, социальные институты в XXI веке. Вопросы социальной и политической модернизации. Сборник научных статей. – Санкт-Петербург. – 2021. – С. 9-16.

16. Новиков Д.А. Методология управления. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2011 – 128 с.

17. Зиненко А.С., Бардулин Е.Н. Диверсификация оборонно-промышленного комплекса (ОПК) как инструмент минимизации рисков в условиях снижения гособоронзаказа // В сборнике: Теория и практика управления предпринимательскими структурами в современных условиях. Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. Под общей редакцией В.А. Молодцова [и др.]. – Санкт-Петербург. – 2022. – С. 37-43.

18. Чебышев И.И. Внутренний контроль как фактор достижения цели оборонно-промышленного комплекса по диверсификации производства // Экономика и управление: проблемы, решения. – 2021. – Т. 1. – № 3 (111). – С. 63-67.

19. Овсянникова Т.А., Зарубин В.И. Механизм реализации стратегии предприятия // Новые технологии. – 2018. – № 4. – С. 179-185.

20. Мовтян Б.А., Данилаев Д.П. Оценка факторов риска выполнения гособоронзаказа концерна ОПК // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2018. – Т. 21. – № 3. – С. 38-43.

*Статья поступила в редакцию 06.08.2022*

*Статья принята к публикации 16.09.2022*

УДК 519.6

DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0011

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОАКТИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ ПРИ  
ЭЛЕКТРОВОССТАНОВЛЕНИИ ИОНОВ ЖЕЛЕЗА НА ПРОТОЧНОМ ТРЕХМЕРНОМ ЭЛЕКТРОДЕ**

© Автор(ы) 2022

SPIN-код: 9075-4096

AuthorID: 642415

ORCID: 0000-0003-4511-7176

ResearcherID: GOP-3388-2022

ScopusID: 57190165261

**КУЗИНА Валентина Владимировна**, кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Информационно-вычислительные системы»

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства  
(440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28, e-mail: kuzina@pguas.ru)*

SPIN-код: 4008-3010,

AuthorID: 43826

ORCID: 0000-0001-8622-9364

ResearcherID: A-0000-0000

ScopusID: 7004176778

**ВАРЕНЦОВ Валерий Константинович**, доктор технических наук, профессор,  
ведущий научный сотрудник лаборатории электрохимии гетерогенных систем

*Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН  
(630128, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 18, e-mail: vvk@ngs.ru)*

SPIN-код: 1569-1966

AuthorID: 47930

ORCID: 0000-0003-3057-4980

ResearcherID: AAD-1496-2021

ScopusID: 8900920000

**КОШЕВ Александр Николаевич**, доктор химических наук,  
профессор кафедры «Информационно-вычислительные системы»

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства  
(440028, Россия, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28, e-mail: koshev@pguas.ru)*

**Аннотация.** Приводится исследование процесса электровосстановления ионов железа на проточном трехмерном электроде (ПТЭ) с использованием математического моделирования. Цель исследования – изучить основные закономерности распределения электроактивных компонентов по толщине объемно-пористого проточного электрода, а также исследовать влияние поляризации и локальной плотности тока на эффективность процесса. Приведенные методики расчета распределения электроактивных компонентов позволили изучить влияние габаритной плотности тока на восстановление ионов трехвалентного железа  $Fe(III)$ . В результате выполненного исследования, приведенного в настоящей работе, показано, что плотность тока является одним из основных технологических параметров, позволяющих обеспечить высокую производительность электрохимического процесса на проточных трехмерных электродах, в том числе из углеродных волокнистых материалов.

**Ключевые слова:** трехмерный проточный электрод, математическое моделирование, численные расчеты, поляризация, локальная плотность тока, углеграфитовые волокнистые материалы

**THE CALCULATION METHODOLOGY OF ELECTRICALLY ACTIVE COMPONENTS  
DISTRIBUTION DURING THE ELECTRICAL REDUCTION OF IRON IONS  
ON A FLOWING THREE-DIMENSIONAL ELECTRODE**

© The Author(s) 2022

**KUZINA Valentina Vladimirovna**, candidate of Technical Sciences,  
associate professor of the department «Information and computing systems»

*Penza State University of Architecture and Construction  
(440028, Russia, Penza, German Titov St., 28, e-mail: kuzina@pguas.ru)*

**VARENTSOV Valery Konstantinovich**, doctor of technical Sciences, professor,  
leading researcher Laboratory of Electrochemistry of Heterogeneous Systems

*Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry of Siberian branch of Russian Academy of Science  
(630128, Russia, Novosibirsk, st. Kutateladze, 18, e-mail: vvk@ngs.ru)*

**KOSHEV Alexander Nikolaevich**, doctor of Chemistry Science,  
professor of the department «Information and computing systems»

*Penza State University of Architecture and Construction*  
 (440028, Russia, Penza, German Titov St., 28, e-mail: koshev@pguas.ru)

**Abstract.** The following article represents the results of the research of the process of electro reduction of iron ions on a flowing three-dimensional electrode (FTE) with the application of mathematical modeling. The purpose of the research is to study the main peculiarities of electroactive components distribution over the thickness of a volume-porous flow electrode, as well as to investigate the effect of polarization and local current density on the efficiency of the process. The mentioned methods of the distribution calculating of electroactive components made it possible to analyze the effect of the overall current density on the reduction of ferric iron ions  $Fe(III)$ . As a result of this presented research, it is shown that the current density is one of the main technological parameter that make it possible to ensure the high performance of the electrochemical process on flowing three-dimensional electrodes, including those made of carbon fiber materials.

**Keywords:** flowing three-dimensional electrode, mathematical modeling, numerical calculations, polarization, local current density, carbon-graphite fibrous materials.

**Для цитирования:** Кузина В.В. Методика расчета распределения электроактивных компонентов при электровосстановлении ионов железа на проточном трехмерном электроде / В.В. Кузина, В.К. Варенцов, А.Н. Кошев // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022. – Т. 11. – № 3(59). – С. 69-73. – DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0011.

**Введение.** Эффективным методом решения задачи научного исследования закономерностей процессов электрохимического извлечения металлов на проточные трехмерные электроды (ПТЭ) из углеродистых волоконистых материалов (УВМ) является метод математического моделирования, позволяющий путем численных экспериментов изучать как возможные электрохимические реакции, так и их результаты в объеме объемно-пористых электродов [1-17]. Использование методов математического моделирования и вычислительных методов позволяет определить влияние основных технологических параметров на эффективность электрохимических процессов и, в ряде случаев, оптимизировать рабочие условия электролиза, такие как скорость потока, плотность тока, концентрация реагентов и температура [8-11]. Таким образом, расчет распределения электроактивных компонентов и исследование электрохимических процессов, протекающих в системах с ПТЭ, с использованием математического моделирования, является актуальной задачей.

Математическая модель электролиза в ПТЭ основана на теоретическом описании процессов электроосаждения и представляет собой систему дифференциальных, интегральных и алгебраических уравнений, описывающих распределение основных электрохимических функций: концентрации электроактивных веществ, поляризации и парциальных токов в порах пористого трехмерного электрода. При этом электрохимические параметры, используемые при описании процессов в ПТЭ, определены как из литературных источников (такие, как равновесные потенциалы электродных реакции электроактивных компонентов, числа массопереноса, коэффициенты конвективной диффузии, валентности разряжающихся ионов и др.), так и получены экспериментальными методами (такие, как электропроводные характеристики системы с ПТЭ, удельная реакционная поверхность, начальная пористость УВМ и др.).

Аналитическое решение системы дифференциальных уравнений не всегда возможно получить, обычно оно ограничивается лишь рассмотрением некоторых частных случаев. Поэтому авторами применялись компьютерные эксперименты, основанные на численных методах решения моделирующих уравнений, описывающих процессы и закономерности электрохимической регенерации электролитов железнения металлических поверхностей.

**Методология.** Цель исследования – изучение на основе математического моделирования основных закономерностей распределения электроактивных компонентов по толщине объемно-пористого проточного электрода, а также исследовать влияние поляризации и локальной плотности тока на эффективность процесса.

При протекании процессов на УВЭ преимущественный перенос массы и заряда проходит путем принудительной конвекции, когда диффузия и естественная конвекция пренебрежительно малы. Тогда согласно приведенному в работе [13] математическому описанию, процесс восстановления  $n$  компонентов в объеме пористого электрода описывается следующим уравнением:

$$j_i(x) = \frac{j_{i0}(e^{M_{i1}} - e^{M_{i2}})}{1 + j_{i0}e^{M_{i1}}/z_i F C_i(x) v(x)} \quad (1)$$

где  $j_{i0}$  – плотность тока обмена;  $j_i$  – плотность поляризующего тока;  $e^{M_{i1}}$  и  $e^{M_{i2}}$  – потенциалы;  $z_i$  – заряд  $i$ -го электроактивного компонента ( $i = 1, \dots, 4$ );  $F$  – число Фарадея, Кл·моль<sup>-1</sup>;  $D$  – коэффициент диффузии, см<sup>2</sup>/с;  $C_i(x)$  – концентрация  $i$ -го электроактивного компонента ( $i = 1, \dots, 4$ );  $v(x)$  – линейная скорость протока электролита, распределенная по толщине ПТЭ в силу возможного неравномерного зарастания материала электрода металлом.

Вводя в рассмотрение величину  $j_{ip}(x) = z_i F D C_{ix} / r_w$ , которая в первом приближении отражает значение предельного диффузионного тока, уравнение (1) можно представить в следующем виде:

$$j_i(x) = \frac{P e^{j_{i0}}(e^{M_{i1}} - e^{M_{i2}})}{P e^{j_{i0}} + j_{i0} e^{M_{i1}} / j_{ip}(x)} \quad (2)$$

Для исследования выбрана электрохимическая система со следующими электродными реакциями:  $Fe(III) + e \rightarrow Fe(II)$ ;  $Fe(II) + 2e \rightarrow Fe^0$ ;  $2H^+ \rightarrow H_2$ . Использовался электролит железнения следующего состава: концентрация ионов двухвалентного железа  $Fe(II)$  – 2,5 моль/л, концентрация ионов трехвалентного железа  $Fe(III)$  – от  $1,8 \cdot 10^{-3}$  до  $1,8 \cdot 10^{-1}$  моль/л, электропроводность раствора  $\chi_G = 0,14$  См/см. Использованные катоды выполнены из УВМ марок ВИНН-250, НТМ-100, НТМ-200, ВВП-66-95, КНМ, ВНГ-50, ТГН и ТВШ. Параметры катодов: удельная реакционная поверхность электрода ( $S_v$ , см<sup>2</sup>/см<sup>3</sup>), электропроводность электрода ( $\chi$ , См/см<sup>3</sup>) и пористость материала электрода ( $\epsilon$ ) взяты из литературных источников [14, 15]. При проведении исследований учитывалось изменение параметров электродных материалов при сжатии образцов в 2 раза, кроме того плотность тока ( $j$ , А/см<sup>2</sup>) и линейная скорость протока ( $u$ , см/с), варьировались в заданных пределах.

Значения коэффициента диффузии  $D^{Fe(II)}$  и тока обмена  $j_0$  ионов  $Fe(II)$  реакции  $Fe(III) + e \rightarrow Fe(II)$ , приведены в работах [18,19]:  $0,535 \cdot 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с и  $0,019$  А/см<sup>2</sup>. Стационарный потенциал рассматриваемой реакции, согласно этим же исследованиям, составляет  $E^{Fe(III)} = +0,643$  В. Используемое при расчетах значение

коэффициента переноса ионов  $Fe(III)$  выбрано равным  $0,59$  [20].

Последующая реакция  $Fe(II) + 2e \rightarrow Fe^0$  характеризуется следующими параметрами:  $D^{Fe(II)} = 0,6 \cdot 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с;  $\alpha^{Fe(II)} = 0,43$  [20];  $z^{Fe(II)} = 2$ . Стационарный потенциал, согласно исследованиям авторов  $-E^{Fe(II)} = -0,62$  [18].

Ток обмена ионов  $Fe(II)$  ( $j_0^{Fe(II)}$ ) определялся с учетом достаточно больших значений удельной поверхности и микрошероховатости волокон УВЭ. Для коррекции значений тока обмена был выбран коэффициент, равный 100. С учетом сделанных замечаний, величина тока обмена, используемого в расчетах, составила  $1 \cdot 10^{-6}$  А/см<sup>2</sup> [21].

Для реакции выделения водорода выбраны следующие кинетические параметры:  $E = -0,83$  В [14],  $\alpha = 0,49$  [18], ток обмена  $-2 \cdot 10^{-6}$  [21].

Кроме перечисленных, в рассматриваемой электродной системе возможна электродная реакция с участием молекулярного кислорода:  $E_p^{O_2} = 1,1$  В;  $j_p^{O_2} = 10^{-8}$  А/см<sup>2</sup>;  $z^{O_2} = 2$ .

**Результаты.** Экспериментальные значения основных кинетических параметров протекающих процессов при регенерации электролитов железнения на ПТЭ, которые составили основу для проведения численных компьютерных расчетов, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Экспериментальные значения кинетических параметров электрохимических процессов при регенерации электролита железнения на ПТЭ

Комп/конст	Концентр. (г/см <sup>3</sup> )	Стационарный потенц. (Е, В)	Ток обмена ( $j_0$ , А/см <sup>2</sup> )	Коэфф. переноса ( $\alpha_m$ ) ( $k_m$ , см/с)	Коэффициент диффузии (D, см <sup>2</sup> /с)
$Fe^{(III)} \rightarrow Fe^{(II)}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	0,643	0,019	0,59	$0,535 \cdot 10^{-5}$
$Fe^{(II)} \rightarrow Fe^{(0)}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$	0,620	$1 \cdot 10^{-6}$	0,43	$0,6 \cdot 10^{-5}$
Кислород	$2 \cdot 10^{-5}$	0,4 – 0,5	$1 \cdot 10^{-10}$	0,5	$3 \cdot 10^{-6}$
Водород	–	-0,83	$2 \cdot 10^{-6}$	0,49	–

Результаты были получены в численном виде, на основании которых строились графики зависимостей, отражающих закономерности процессов электролиза на УВЭ.

Для подтверждения их достоверности проводилось сравнение с полученными авторами данными экспериментальных исследований.

**Влияние плотности тока.** Проведенные авторами численные эксперименты показывают (рис. 1), что с ростом плотности поляризующего тока (до  $1000$  А/м<sup>2</sup>) наблюдается существенное возрастание общей скорости электрохимического процесса с дальнейшей ее стабилизацией, при этом, при определенном  $\epsilon$  плотности тока происходит снижение выхода по току реакции  $Fe(III) + e \rightarrow Fe(II)$ , что указывает на наличие побочных реакций образования металлического железа и газообразного водорода.

Результаты расчетов, приведенные, на рисунке 2, показывают увеличение неравномерности распределения концентрации трехвалентного железа по толщине ПТЭ с ростом поляризующего тока, что не противоречит теоретическим закономерностям процессов электролиза на ПТЭ.

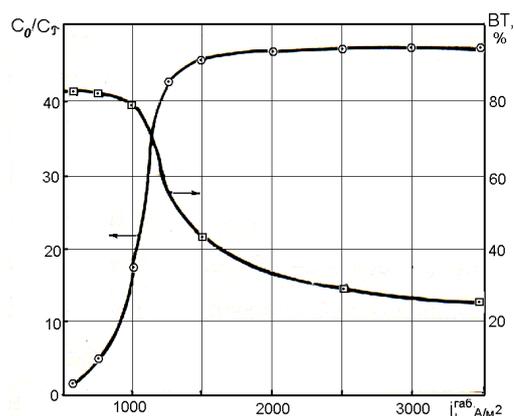


Рисунок 1 – Влияние плотности поляризующего тока на скорость восстановления трехвалентного железа до двухвалентного и выход по току рассматриваемой реакции. Параметры процесса: материал ВИНН-250;  $S_v = 560$  см<sup>2</sup>/г;  $\epsilon = 0,925$ ;  $\chi_r = 0,4$  См/см;  $L = 0,1$  см;  $u = 0,1$  мл/с; исходная  $C^{Fe(III)} = 8,9 \cdot 10^{-3}$  моль/л

Анализ результатов расчетов, приведенных на рисунке 3а показывает, что с ростом габаритного тока распределение парциальной поляризации реакции становится существенно неравномерным, при

этом минимум поляризации сдвигается в середину электрода, что характерно для случая сравнимых по величине электропроводностей твердой и жидкой фаз, имеющем место для рассматриваемой электрохимической системы. Расчеты показывают также, что при  $j_k \approx 1200 \text{ A/m}^2$  достигается предельный ток по реакции  $\text{Fe(III)} + e \rightarrow \text{Fe(II)}$ , следовательно, дальнейшее увеличение плотности габаритного тока при прочих равных условиях не приводит к повышению скорости этой реакции.

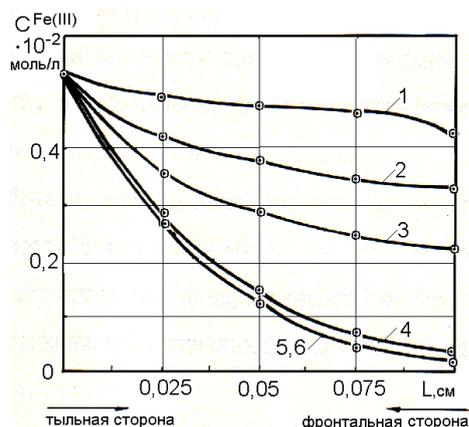


Рисунок 2 – Распределение концентрации ионов трехвалентного железа по толщине электрода.

Значения габаритного тока ( $\text{A/m}^2$ ):

1 – 200; 2 – 300; 3 – 500; 4 – 1000; 6 – 1500 и 2000

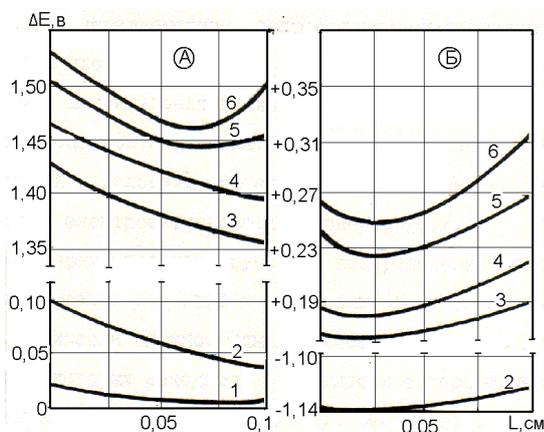


Рисунок 3 – Распределения парциальных поляризации реакций  $\text{Fe(III)} + e \rightarrow \text{Fe(II)}$  (А) и  $\text{Fe(II)} + 2e \rightarrow \text{Fe}^0$  (Б) по толщине ПТЭ. Плотность поляризующего тока ( $\text{A/m}^2$ ): 1 – 300; 2 – 500; 3 – 700; 4 – 1000; 5 – 3000; 6 – 5000

Сравнение характера распределений парциальных поляризаций реакций  $\text{Fe(III)} + e \rightarrow \text{Fe(II)}$  и  $\text{Fe(II)} + 2e \rightarrow \text{Fe}^0$  указывает на интересную закономерность положения минимума поляризации первой и второй реакции: в первом случае минимум расположен ближе к тыльной стороне электрода, а для второй реакции – к фронтальной стороне электрода. Такая же закономерность наблюдается и для максимальных значений парциальных поляризаций ПТЭ.

Одновременно рассмотрено и распределение локальных плотностей тока по толщине электрода (рис. 4). Для реакции  $\text{Fe(III)} + e \rightarrow \text{Fe(II)}$  их значения на

тыльной стороне поверхности существенно выше, чем на фронтальной; эта разница возрастает с увеличением габаритной плотности тока до  $1000 - 1500 \text{ A/m}^2$ , оставаясь неизменной при его дальнейшем увеличении.

Для реакции  $\text{Fe(II)} + 2e \rightarrow \text{Fe}^0$  наибольшие значения локальной плотности тока характерны для фронтальной стороны электрода. В интервале  $1500 - 2000 \text{ A/m}^2$  разница между значениями тока на фронтальной и тыльной сторонах электрода невелика, но существенно возрастает с увеличением величины габаритной плотности тока до  $300 \text{ A/m}^2$  и выше, что соответствует условиям, при которых происходит выделение металлического железа.

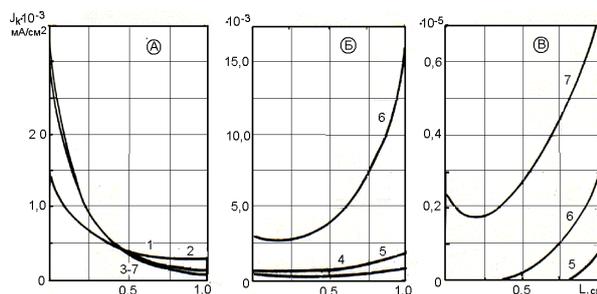


Рисунок 4 – Распределения парциальных плотностей тока реакций  $\text{Fe(III)} + e \rightarrow \text{Fe(II)}$  (А),  $\text{Fe(II)} + 2e \rightarrow \text{Fe}^0$  (Б) и  $2\text{H}^+ + 2e \rightarrow \text{H}_2$  (Б) по толщине ПТЭ при значениях габаритного тока ( $\text{A/m}^2$ ): 1 – 500; 2 – 700; 3 – 1000; 4 – 1500; 5 – 2000; 6 – 3000; 7 – 5000

Как показали расчеты (рис. 4б), при плотности габаритного тока  $\approx 2000 \text{ A/m}^2$  начинается процесс выделения газообразного водорода, что, естественно, приводит к снижению выхода по току для основной реакции выделения металлического железа, при этом водород интенсивнее выделяется на фронтальной стороне ПТЭ.

**Обсуждение.** Теоретическое исследование электрохимической системы с электродными реакциями последовательного восстановления железа  $\text{Fe(III)} + e \rightarrow \text{Fe(II)}$ ,  $\text{Fe(II)} + 2e \rightarrow \text{Fe}^0$ ; водорода:  $2\text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2$  и кислорода  $\text{O}_2 \rightarrow 2\text{O}_{\text{адс}}$ ;  $\text{O}_{\text{адс}} + 2\text{H}^+ + 2e \rightarrow \text{H}_2\text{O}$  позволяют получить наиболее полное представление о связи электрохимических процессов в рассматриваемой многокомпонентной системе и влиянии различных факторов на результаты электрохимических взаимодействий. Ранее исследования такого рода в полной мере, вероятно, не проводились, так как для их реализации необходимы математические модели и программные комплексы, позволяющие исследовать многостадийные процессы электроокисления и электровосстановления ионов металлов с учетом восстановления ионов водорода и молекулярного кислорода в проточном трехмерном электроде, подобные разработанным авторами данной публикации [10].

Известны публикации, например, [23], в которых представлены математические модели и численные исследования одно-, максимум, двухкомпонентных

систем, при этом процессы рассмотрены в статическом состоянии, без учета изменения характеристик электрода и электролита в процессе электроосаждения металла, что может существенно исказить численные результаты и их соответствие реальному процессу.

Сведения о существовании программных комплексов для расчета многокомпонентных электрохимических систем с ПТЭ, созданных другими авторами, авторами данной статьи в литературе не найдены. Решение заявленной задачи экспериментальными методами не представляется возможным из-за предельной сложности и громоздкости проведения необходимых экспериментов.

**Выводы.** Основным результатом данной публикации можно считать проведенные авторами методики расчета на основе математического моделирования распределения электроактивных компонентов при электровосстановлении ионов железа на проточном трехмерном электроде. Выполненное исследование, представленное в настоящей работе, показало, что плотность тока является одним из основных технологических параметров, позволяющих обеспечить высокую производительность рассматриваемых электрохимических процессов в объеме проточного трехмерного электрода из волокнистого углеродного материала.

Для проведения численных расчетов по приведенной математической модели был выбран ряд физических и кинетических параметров, в полной мере характеризующих исследуемую систему.

Дальнейшие изыскания в данном направлении могут быть связаны как с совершенствованием методов математического моделирования, например, возможности расчета многокомпонентных систем с растворами ионов других металлов, так и с экспериментальными исследованиями, необходимыми для определения электрохимических параметров и подтверждения результатов численных и теоретических выводов.

Необходима также дальнейшая работа над существующими программными комплексами [10] с целью повышения их универсальности, быстродействия и удобства для пользователей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Математическое моделирование и теория распределения поляризации в электрохимических реакторах с проточными объемно-пористыми катодами / А.Н. Кошев, В.К. Варенцов, М.А. Чиркина, В.Г. Камбург // Математическое моделирование. – 2011. – Т. 23. – № 8. – С. 110-126.
2. Кошев А.Н., Кузина В.В. Разработка и исследование математических моделей нестационарных процессов в электрохимических реакторах с проточными трехмерными электродами: моногр. Пенза: ПГУАС. – 2011. – 119 с.
3. Кошев А.Н., Варенцов В.К. Моделирование эффекта образования анодных зон на катодно поляризованном проточном трехмерном электроде // Математическое моделирование. – 2017. – Т. 29. – № 7. – С. 81-93.
4. Варенцов В.К., Батаев И.А. Ионообменные мембраны в процессах электроизвлечения золота из растворов на проточные углеродные волокнистые электроды // Мембраны и мембранные технологии. – 2017. – Т. 7. – № 5. – С. 344-351.
5. Варенцов В.К., Варенцова В.И. Электроосаждение металлов и их оксидов на электрохимически модифицированные трехмерные углеродные материалы // Физикохимия поверхности и защита материалов. – 2017. – Т. 53. – № 6. – С. 616-632.
6. Варенцов В.К., Кошев А.Н. Моделирование процесса газообразования водорода в проточных трехмерных электродах при извлечении металлов из растворов электролитов // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – № 3 (32). – С. 128-135.
7. Окислительно-восстановительные процессы на трехмерных электродах. Математическое моделирование, теория, эксперимент: моногр. / В.К. Варенцов, А.Н. Кошев, В.И. Варенцова, В.В. Кузина. Пенза: ПГУАС. – 2020. – 172 с.
8. Варенцов В.К., Кошев А.Н., Варенцова В.И. Современные проблемы электролиза и задачи оптимизации процессов в реакторах с трехмерными углеродными электродами: моногр. Пенза: ПГУАС. – 2015. – 286 с.
9. Углеродные волокнистые электроды: свойства, модификация, процессы и электролизеры. Математическое моделирование и оптимизация: моногр. / В.К. Варенцов, А.Н. Кошев, В.И. Варенцова, В.В. Кузина. Пенза: ПГУАС. – 2021. – 176 с.
10. Гвоздева И.Г., Кошев А.Н., Воронцов А.А. Программный комплекс для расчета параметров электрохимического процесса в проточных углеродных волокнистых электродах. Св. о регистрации программы для ЭВМ 2022616439, 08.04.2022. Заявка № 2022614434 от 24.03.2022.
11. Mathematical modeling and simulation of electrochemical reactors: A critical review / F.F. Rivera, T. Pérez, L.F. Castañeda, J.L. Nava // Chemical Engineering Science. – 2021. Vol. 239, 116622. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.116622>.
12. Saleh M. Mathematical modeling of gas evolving flow-through porous electrodes // Electrochimica Acta. 1999. № 45(6). Pp.: 959-967. DOI:10.1016/S0013-4686(99)00296-0.
13. Варенцов В.К., Кошев А.Н., Сухов И.Ф. Процессы совместного электроосаждения золота и серебра из сернокислых растворов на проточном электроде // Теоретические основы химической технологии. – 2018. – Т. 52. – № 4. – С. 391-402.
14. Варенцов В.К., Жеребилов А.Ф., Малей М.Д. Углеродные волокнистые материалы – новые электроды для извлечения металлов из разбавленных растворов. 1. Нетканые углеродные волокнистые материалы // Изв. СО АН СССР. Сер. хим. наук. – 1984. – № 17. – Вып. 6. – С. 120-127.
15. Жеребилов А.Ф., Варенцов В.К. Углеродные волокнистые материалы – новые электроды для извлечения металлов из разбавленных растворов. 2. Тканые углеродные волокнистые материалы // Изв. СО АН СССР. Сер. хим. наук. – 1987. – № 2. – Вып. 1. – С. 110-115.
16. Ferreira V.K. Three-dimensional electrodes for the removal of metals from dilute solutions: A review // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2008. № 29(4) – Pp. 330-371. DOI:10.1080/08827500802045586.
17. Graphite felt as a versatile electrode material: Properties, reaction environment, performance and applications. / L. Fabián, F.C. Walsh, J.L. Nava, C.P. de León // Electrochimica Acta. – 2017. – 258. DOI:10.1016/j.electacta.2017.11.165.
18. Ковалева О.В. Электрохимическое исследование редокс-процессов в железодержащих водных растворах // Revista științifică a Universității de Stat din Moldova «Studia Universitatis», Seria «Științe ale Naturii». – 2009, nr. 6(26). – Pp. 195-203.
19. Ковалева О.В. Изучение кинетических закономерностей восстановления ионов Fe(III) до Fe(II) в концентрированных электролитах // Revista științifică a Universității de Stat din Moldova «Studia Universitatis», Seria «Științe ale Naturii». – 2013, nr. 6(26). – Pp. 195-203.
20. Справочник по электрохимии / Под ред. А.М. Сухотина. Л.: Химия. – 1981. – 488 с.
21. Феттер К. Электрохимическая кинетика. М.: Химия, 1967. – 856 с.
22. Фрумкин А.Н. Кинетика электродных процессов / А.Н. Фрумкин, В.С. Багоцкий, З.А. Иофа и др. М.: Изд. МГУ. – 1952. – 321 с.
23. Маслий А.И., Поддубный Н.П., Медведев А.Ж. Распределение габаритной плотности тока внутри пористого электрода с протоком раствора вдоль токоподвода. Влияние параметров электрода и электрохимических реакций // Электрохимия. – 2016. – Т. 52. – № 6. – С. 643-650.

Статья поступила в редакцию 18.07.2022

Статья принята к публикации 16.09.2022

УДК 681.5.08; 621.317.1; 621.373.12  
DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0012

### ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ НА ОСНОВЕ ПРЯМОГО ЦИФРОВОГО СИНТЕЗА

© Автор(ы) 2022  
SPIN: 1222-5399  
AuthorID: 517750  
ORCID: 0000-0003-0933-1212  
ResearcherID: P-2232-2015  
ScopusID: 7004205146

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

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

**Аннотация.** Прямой цифровой синтез частоты широко применяется для создания произвольных форм сигнала с точным безынерционным заданием частоты в технике электрических измерений в качестве источника эталонных воздействий и в беспроводной связи в качестве гетеродинов, в генераторах испытательных сигналов для контроля систем передачи информации. Настоящая работа посвящена совершенствованию схемотехники цифрового синтеза сигналов, ставящему целью повышение точности задания частоты и расширение функциональных возможностей измерительных генераторов. Предложены варианты исполнения цифровых синтезаторов сигналов, первый из которых позволяет существенно повысить разрешение по частоте за счет изменения модуля счета аккумулятора фазы, а второй благодаря введению сопряженного с основным каналом синтеза дополнительного канала, управление которым осуществляется смещенным во времени кодом аккумулятора из основного канала, обеспечить генерирование парных сигналов произвольной формы с прецизионной задержкой между ними. Приведены схемные решения и рассмотрены режимы работы предложенных устройств.

**Ключевые слова:** генератор, синтез, частота, аккумулятор, цифроаналоговый преобразователь, постоянное запоминающее устройство, сумматор.

### FUNCTIONAL GENERATORS BASED ON DIRECT DIGITAL SYNTHESIS

© The Author(s) 2022

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

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

**Abstract.** Direct digital frequency synthesis is widely used to create arbitrary waveforms with precise inertia-free frequency setting in electrical measurement technology as a source of reference effects and in wireless communication as heterodynes, in test signal generators for monitoring information transmission systems. This work is devoted to improving the circuitry of digital signal synthesis, which aims to increase the accuracy of frequency setting and expand the functionality of measuring generators. Variants of digital signal synthesizers are proposed, the first of which allows to significantly increase the frequency resolution by changing the phase accumulator counting module, and the second due to the introduction of an additional channel coupled with the main synthesis channel, which is controlled by a time-shifted battery code from the main channel, to generate paired signals of arbitrary shape with a precision delay between them. Schematic solutions are given and the modes of operation of the proposed devices are considered.

**Keywords:** generator, synthesis, frequency, accumulator, digital-to-analogue converter, read-only memory, adder

**Для цитирования:** Чулков В.А. Функциональные генераторы на основе прямого цифрового синтеза / В.А. Чулков // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022. – Т. 11. – № 3(59). – С. 74-80. – DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0012.

**Введение.** Функциональные генераторы сигналов разнообразной формы находят широкое применение в качестве источников образцовых (тестовых) сигналов в экспериментальной технике, измерительном оборудовании, спутниковой связи и радионавигации [1 – 4]. Такие генераторы обладают высокой точностью задания частоты, формы и других параметров сигналов, отвечают метрологическим требованиям и просты в управлении. Среди функциональных генераторов, составляющих неотъемлемую часть большинства радиотехнических систем, по своим точностным харак-

теристикам и эксплуатационным возможностям выделяются цифровые синтезаторы частоты, обладающие высоким разрешением по частоте и возможностью управления по цифровому интерфейсу.

К настоящему времени сложились два основных подхода к цифровому синтезу частоты: способ фазовой синхронизации (*PLL – Phase Lock Loop*) с дробно-кратным преобразованием опорной частоты и способ прямого цифрового синтеза (*DDS – Direct Digital Synthesis*) [5 – 10].

Методу синтеза частоты с использованием фазо-

вой синхронизации местного управляемого генератора с дробно-кратным умножением частоты опорного генератора, при котором опорные импульсы и импульсы, генерируемые управляемым генератором, перед поступлением на фазовый компаратор проходят через делители частоты с разными коэффициентами деления, широко освещен в литературе. Предложены разнообразны́е усовершенствования базовой структуры, направленные на повышение разрешающей способности по частоте, расширение частотного диапазона и улучшение спектральной чистоты синтезируемых сигналов [11 – 15]. В то же время устройствам подобного типа свойствен общий недостаток, который заключается в продолжительном переходном процессе при изменении генерируемой частоты – времени захвата системы фазовой синхронизации.

В последние годы интенсивное развитие получила схемотехника синтезаторов сигналов на основе прямого цифрового синтеза, отличающаяся исключительными возможностями в части точности устанавливаемой частоты и ее перестройки в широких пределах, причем перестройка частоты осуществляется практически безынерционно. Первой публикацией по прямому цифровому синтезу явилась, видимо, статья *J. Tierney, C. Rader, B. Gold* [16], появившаяся еще в 1971 году. С той поры данное направление получило признание и развитие, подобные цифровые синтезаторы частоты оказались весьма эффективными не только для решения измерительных задач, но и в технике беспроводных коммуникаций и обработки цифровых сигналов [17 – 21]. Однако, несмотря на обилие публикаций по данной тематике, остаются еще не раскрытые резервы совершенствования схемотехники *DDS* применительно к функциональным генераторам измерительных приборов и систем. В частности, функциональные возможности генераторов расширяются с уменьшением шага перестройки частоты и генерирования двух или более эталонных сигналов в заданном фазовом или временном отношении друг

к другу, чему в известных публикациях не уделено должного внимания.

*Целью* настоящей работы является повышение точности задания частоты цифрового синтезатора и разработка схемы функционального генератора парных идентичных сигналов произвольной формы с прецизионной задержкой между ними.

**Методология.** Сбор и систематизация информации по современному состоянию техники прямого цифрового синтеза, выявление перспективных технических решений и обоснование на этой основе схемотехники функциональных генераторов на основе *DDS* с повышенным разрешением по частоте и расширенными функциональными возможностями.

**Результаты.** *Принцип прямого цифрового синтеза частоты.* Для того чтобы обосновать предлагаемые усовершенствования синтезатора сигналов, рассмотрим прежде принцип прямого цифрового синтеза, обратившись к показанной на рисунке 1 типовой структуре устройства *DDS* [22].

Устройство включает:

- регистр инкремента фазы (РИФ), хранимое в нем двоичное число  $D_\phi$  определяет частоту вырабатываемых сигналов  $f_{\text{вых}}$ ;
- аккумулятор фазы (АФ) в виде накапливающего сумматора в составе параллельного сумматора (СМ) и регистра фазы (РФ), тактируемого импульсами опорного генератора (ОГ), который образует на своем выходе цифровой эквивалент фазы периодического выходного напряжения;
- постоянное запоминающее устройство (ПЗУ), хранящее «цифровой образ» формы выходного напряжения и выдающее его фрагменты в соответствии с линейно нарастающим адресом на своем входе;
- цифроаналоговый преобразователь (ЦАП), формирующий ступенчатую функцию с высотой ступеней, пропорциональной коду ПЗУ;
- аналоговый фильтр (ФНЧ) для сглаживания ступенчатого напряжения ЦАП.

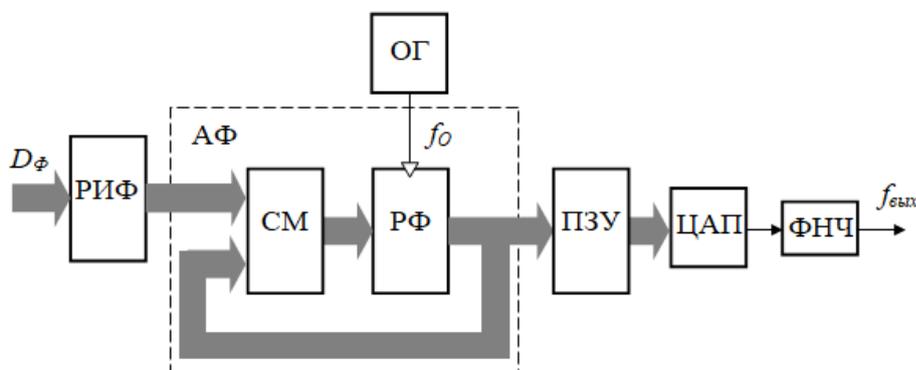


Рисунок 1 – Базовая структура синтезатора частоты с прямым цифровым синтезом

диаграммы (рис. 2) иллюстрируют процесс генерирования выходного напряжения синусоидальной формы (форма напряжения может быть произвольной и назначается прошивкой ПЗУ). Аккумулятор фазы

образует последовательность линейно нарастающих с инкрементом  $D_\phi$  цифровых кодов мгновенной фазы сигнала со скоростью смены кодов, равной опорной частоте  $f_0$ . Увеличение кода  $D_\phi$  приводит к возраста-

нию частоты переполнения регистра в АФ и, следовательно, к повышению частоты выходных сигналов. С помощью ПЗУ линейно нарастающий код фазы преобразуется в изменяющиеся во времени по заданному (в данном случае синусоидальному) закону цифровые отсчеты выходного напряжения. ЦАП преобразует эти отсчеты в ступенчато изменяющееся напряжение, которое далее извлекается от «ступенек» с помощью фильтра нижних частот. Необходимо отметить, что цифровые отсчеты выходного напряжения могут быть не синхронными с самим выходным напряжением в отличие, например, от обычного делителя частоты.

Частота выходных сигналов определяется частотой переполнения АФ и зависит от опорной частоты  $f_0$ , разрядности регистра в аккумуляторе фазы  $n$  и

входного инкремента фазы  $D_\phi$ :

$$f_{\text{вых}} = D_\phi f_0 / 2^n \quad (1)$$

Как следует из (1), шаг перестройки выходной частоты составляет

$$\Delta f_{\text{вых}} = f_0 / 2^n \quad (2)$$

Таким образом, разрешение устройства по частоте зависит не только от опорной частоты, но и в большей степени от разрядности АФ. Например, при  $f_0 = 100$  МГц и  $n = 32$  разрешение синтезатора по частоте составит всего 0,025 Гц. Заметим также, что наиболее сложным узлом устройства является ПЗУ, информационная емкость которого для приведенного примера при разрядности ячеек ПЗУ и числе входов ЦАП равной  $m = 8$  должна быть чрезвычайно высокой  $C = 2^n \cdot m = 2^{32} \cdot 8 = 34359738368$  бит.

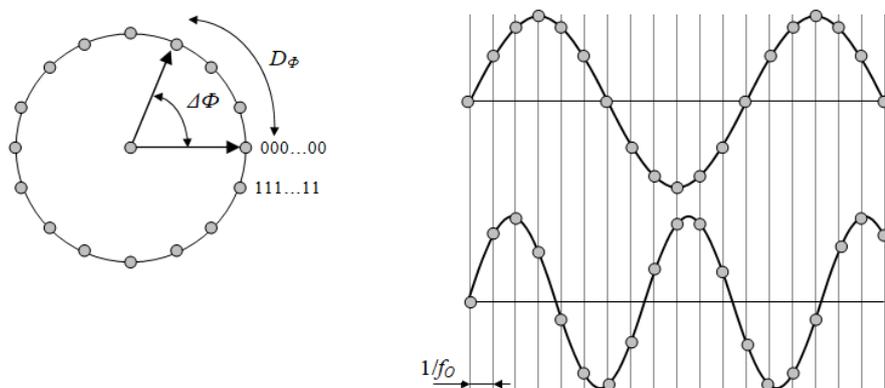


Рисунок 2 – Прямой цифровой синтез – формирование выборок выходного сигнала для разных частот

Способ повышения разрешающей способности DDS по частоте. Идея способа состоит в изменении шага перестройки частоты за счет незначительного изменения численного значения знаменателя в формуле (2) – на одну единицу. Такое изменение требует коррекции модуля счета аккумулятора фазы, для этого необходимо изменять модуль счета входящего в него сумматора. По сравнению с известным способом управления модулем счета сумматора [23] эта задача решается более простыми средствами, поскольку требуемое наименьшее изменение модуля равно единице. Изменение модуля аккумулятора фазы требует сопряженного изменения содержимого ПЗУ, в котором вместо  $2^n$  будет задействовано  $(2^n - 1)$  ячеек памяти. Это можно осуществить заменой одного ПЗУ на другой с последующим выбором того или иного ПЗУ в соответствии с назначаемым режимом работы. На рисунке 3а изображена схема цифрового синтезатора, устроенного подобным образом, а на рисунках 3б и 3в – возможные варианты исполнения входящих в схему логического блока ЛБ и примитивного сумматора  $SM_2$ .

В аккумулятор фазы дополнительно к первому сумматору  $SM_1$  введен второй примитивный сумматор  $SM_2$  и логический блок ЛБ, управляющий вторым сумматором в соответствии с заданным режимом работы. Кроме того устройство содержит второе ПЗУ<sub>2</sub> и мультиплексор МХ, передающий на цифроаналоговый преобразователь выход того или иного ПЗУ.

Мультиплексор представляет собой группу  $m$  простейших мультиплексоров «2→1» с объединенными адресными входами ( $m$  – разрядность ячейки памяти постоянных запоминающих устройств). Логический блок ЛБ состоит из нескольких логических вентилей, назначение которых будет ясно из приведенного ниже порядка работы устройства. Оба сумматора, а также регистр  $RG$  являются  $n$ -разрядными цифровыми узлами. Постоянные запоминающие устройства ПЗУ<sub>1</sub> и ПЗУ<sub>2</sub> при  $n$  адресных входах имеют  $m$ -разрядные ячейки памяти, причем первое постоянное запоминающее устройство хранит  $2^n$  цифровых образов формы синтезируемого выходного сигнала, а второе постоянное запоминающее устройство –  $(2^n - 1)$  подобных цифровых образов. Информационная емкость обоих постоянных запоминающих устройств составляет, следовательно,  $2^n \times m$  бит.

Функция второго цифрового сумматора  $SM_2$  примитивна в том смысле, что у него нет входа второго слагаемого, он добавляет единицу к содержимому первого сумматора, направляя ее на вход переноса  $SM_2$  во втором режиме работы. Ввиду этого он может быть построен по упрощенной схеме на  $n$  полусумматоров, соединенных последовательно по цепи распространения переноса. При этом первый вход первого в цепочке полусумматоров служит входом переноса  $SM_2$ , а вторые входы всех полусумматоров – его входом слагаемого.

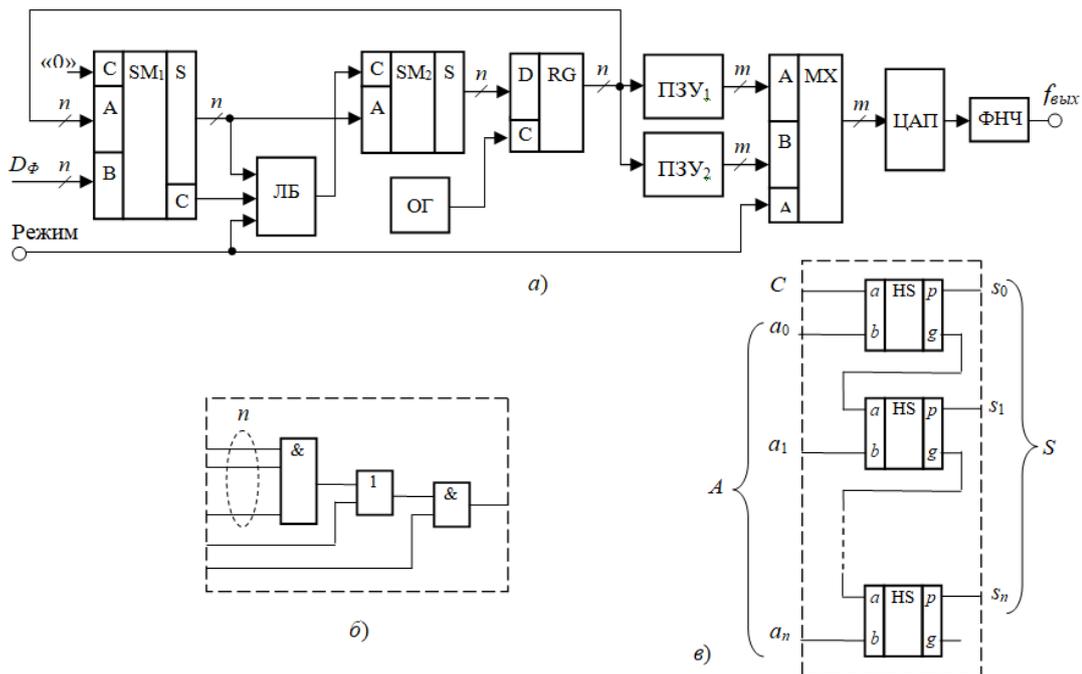


Рисунок 3 – Цифровой синтезатор частоты с повышенным разрешением

Устройство работает в следующем порядке:

В первом режиме работы при нулевом значении сигнала на управляющем входе логический блок ЛБ удерживает на своём выходе уровень логического «0», при этом второй сумматор  $SM_2$  в отсутствии входного сигнала переноса передает на свой выход  $n$ -разрядное число с выхода первого цифрового сумматора без изменения. Поскольку на адресном входе мультиплексора присутствует уровень логического «0», то он передает на свой цифровой  $m$ -разрядный выход текущее выходное состояние первого ПЗУ. В данном режиме устройство представляет собой обычное устройство прямого цифрового синтеза (рис. 1), образующего на выходе сигналы с формой, запрограммированной в первом постоянном запоминающем устройстве, и с частотой, определяемой выражением (1). Фильтр нижних частот сглаживает ступеньки напряжения с выхода цифроаналогового преобразователя.

Во второй режим работы устройство переходит при поступлении уровня логической «1» на управляющий вход синтезатора. Тогда мультиплексор в соответствии с новым адресным кодом начинает передавать на входы цифроаналогового преобразователя последовательность чисел с выхода второго ПЗУ, а в логическом блоке логической единицей по третьему входу открывается цепь передачи сигнала через двухвходовый вентиль И. В процессе работы аккумулятор образует последовательность чисел, увеличивающихся с инкрементом  $D_\phi$ . В соответствии с этим числом – адресом второго ПЗУ последний выдает цифровые образы сигнала, которые, пройдя через мультиплексор, с помощью цифроаналогового преобразователя и фильтра нижних частот преобразуются в сигналы напряжения.

Так продолжается до момента, когда первый сумматор  $SM_2$  достигает состояния всех единиц на своем выходе, что фиксируется  $n$ -входовым вентиляем в логическом блоке, либо когда появляется сигнал переноса на его соответствующем выходе, который далее поступает на второй вход вентиля ИЛИ в логическом блоке. В том и другом случаях на выходе логического блока появляется уровень логической «1», передаваемый на вход переноса второго сумматора. В данном режиме модуль счета аккумулятора, образованного сумматорами и регистром, изменяется: вместо  $2^n$ , который был в первом режиме работы, он становится равным  $(2^n - 1)$ . Это происходит благодаря тому, что при достижении первым сумматором состояния  $(2^n - 1)$ , либо при превышении этого состояния, из него вычитается модуль счета  $(2^n - 1)$ . Вычитание чисел, как известно, в цифровой технике выполняется в дополнительном коде путем сложения уменьшаемого с отрицательным числом – вычитаемым, которое в дополнительном коде представляется его поразрядной инверсией с добавлением единицы. Примитивный второй сумматор 2 не имеет входа второго слагаемого, что равносильно нулю на его отсутствующем втором входе (00...00 – это поразрядная инверсия 11...11 =  $(2^n - 1)$ ). Единица добавляется по входу переноса второго цифрового сумматора 2.

Таким образом, модуль счета аккумулятора во втором режиме оказывается равным  $(2^n - 1)$ . Благодаря этому частота генерируемых устройством сигналов будет отличаться от (1), а именно, станет равной

$$f = \frac{D_\phi}{2^n - 1} f_0. \quad (3)$$

Если минимальный шаг перестройки частоты в первом режиме работы составлял (при  $D_\phi = 1$ ) величину

ну  $(\Delta f)_1 = f_0 / 2^n$ , то во втором режиме он увеличивается до  $(\Delta f)_2 = f_0 / (2^n - 1)$ . Это означает, что частоту выходных сигналов путем выбора надлежащего значения  $D_\phi$  на входе управления частотой можно устанавливать с шагом

$$\Delta f = (\Delta f)_2 - (\Delta f)_1 = \left( \frac{1}{2^n - 1} - \frac{1}{2^n} \right) f_0 = \frac{f_0}{2^n(2^n - 1)}, \quad (4)$$

много меньшим, чем в базовом устройстве.

Если же несколько снизить требования к точности формы выходного сигнала, то указанный выигрыш в точности установления частоты можно сопроводить существенным упрощением устройства за счет уменьшения разрядности цифровых узлов.

Генерирование парных сигналов. В ряде случаев

при проведении радиотехнических измерений требуется генерировать пару сигналов одинаковой формы и частоты, разделенную заданным интервалом времени. Как правило, в известных устройствах такого назначения генерируются квадратурные гармонические сигналы, необходимые в некоторых системах обработки сигналов [24 – 27], известны, однако, измерительные генераторы для выработки пары импульсов в регулируемом фазовом отношении. Принцип *DDS* позволяет достаточно просто решить задачу синтеза пары или более сигналов произвольной формы в управляемой по цифровому интерфейсу задержке между ними. Для этого организуется второй канал формирования сигнала, аналогичный основному (рис. 4).

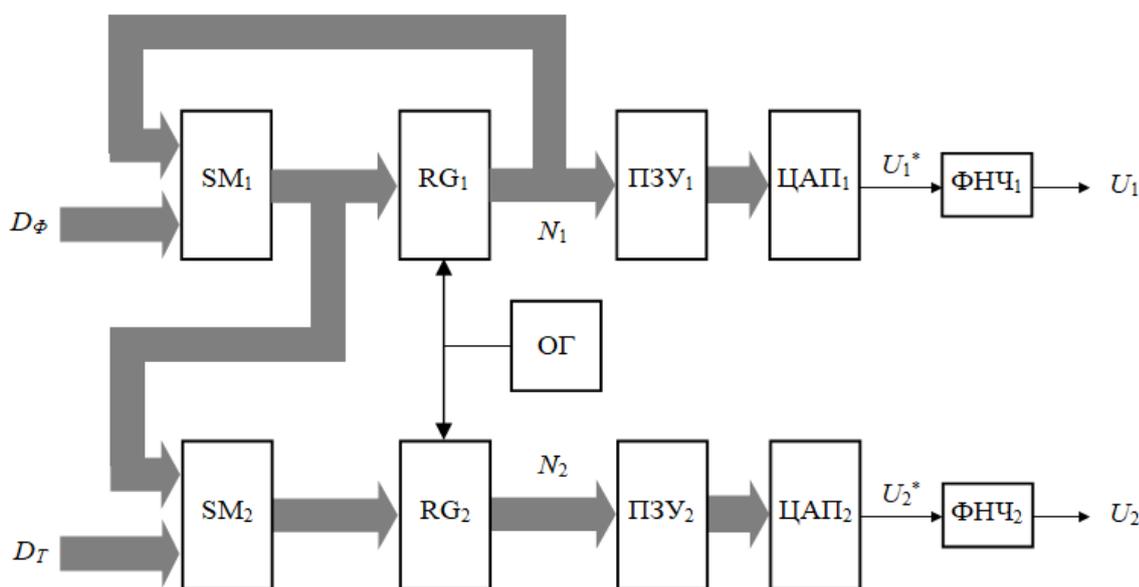


Рисунок 4 – Генератор парных сигналов произвольной формы

Первый канал устройства работает абсолютно так же, как работает типовое устройство *DDS*. Частота следования сигналов равна частоте переполнения первого сумматора в основном канале и определяется выражением (1). Формирование сигнала во втором канале устройства происходит в том же порядке, однако адрес второго ПЗУ<sub>2</sub> образуется путем добавления к содержимому сумматора основного канала  $N_1$  кода задержки между сигналами  $D_T$ , т.е. этот адрес оказывается равным  $N_2 = N_1 + D_T$ . Поскольку содержимое ПЗУ в обоих идентично, то из ячейки памяти второго ПЗУ<sub>2</sub> на второй ЦАП<sub>2</sub> выводится число, которое соответствует точке синусоиды, сдвинутой в сторону опережения на  $D_T$  тактов, т.е. во времени на  $\Delta t = D_T / f_0$ .

Таким образом, предлагаемое устройство генерирует пару сигналов одинаковой формы, назначаемой прошивкой ПЗУ, смещение во времени между которыми можно регулировать, изменяя цифровой код задержки  $D_T$  между сигналами. По сравнению с базовой схемой *DDS* эта возможность означает расширение функциональных возможностей устройства.

Сумматор  $SM_2$ , входящий в состав аккумулятора

во втором канале, состоящем из узлов, обозначенных на схеме индексом «2», добавляет к содержимому сумматора  $SM_1$  из первого канала, число  $D_T$ , определяющее время задержки между сигналами каналов  $U_1$  и  $U_2$ . Принцип действия устройства поясняется временными диаграммами сигналов, показанными на рис. 5. Обозначения внутренних сигналов устройства имеют индексы 1 и 2, соответствующие номеру канала формирования сигнала. Рисунок 5а иллюстрирует динамику линейного нарастания содержимого первого ( $N_1$ ) и второго ( $N_2$ ) регистров, которое происходит ступеньками в моменты их тактирования. На рисунке 5б представлены формы напряжений, образующихся на выходах первого ( $U_1^*$ ) и второго ( $U_2^*$ ) ЦАП. Сигналограммы второго канала показаны точечными линиями. Для примера форма генерируемых сигналов выбрана синусоидальной.

**Обсуждение.** Функциональные генераторы, способные вырабатывать электрические сигналы заданной формы с регулируемой частотой колебаний являются основным элементом большинства радиотехнических и измерительных систем.

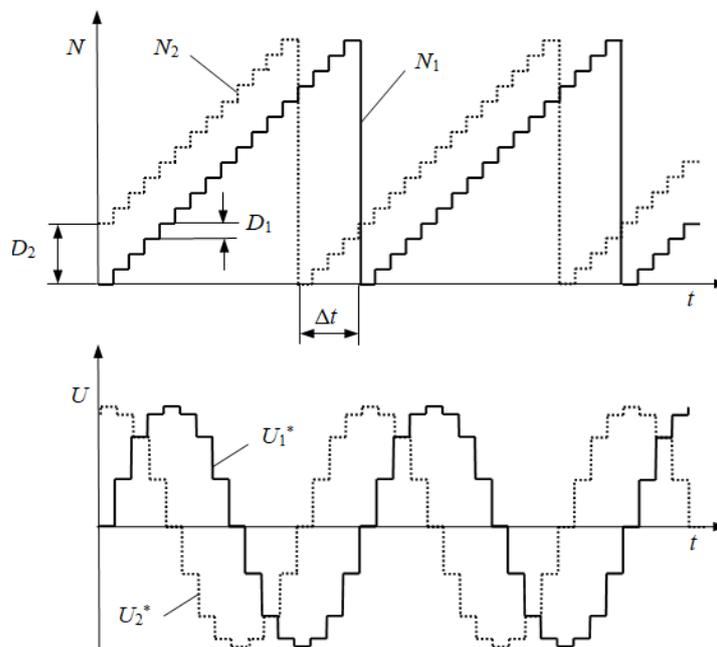


Рисунок 5 – Диаграммы сигналов в генераторе парных сигналов

В качестве функциональных генераторов все большее распространение получают устройства на основе прямого цифрового синтеза частоты *DDS*, имеющие ряд преимуществ перед традиционными синтезаторами, использующими способы прямого счета импульсов и фазовой синхронизации *PLL* в режиме дробно-кратного преобразования опорной частоты. К достоинствам *DDS* кроме высокой разрешающей способности по частоте относится высокое быстродействие при перестройке частоты, поскольку исключаются переходные процессы, свойственные аналоговым узлам в составе системы *PLL*. К недостатку способа *DDS* относится чрезвычайно высокая сложность входящего в его состав постоянного запоминающего устройства, хранящего «цифровые образы» генерируемых сигналов. Кроме того в ряде случаев к синтезатору *DDS* предъявляются повышенные требования в части разрешения, а в измерительных целях целесообразно дополнить устройство дополнительным выходом такого же сигнала, что и в основном канале синтеза, смещенного по оси времени на заданный регулируемый интервал.

В настоящей работе предложены варианты исполнения синтезатора *DDS*, отличающиеся способностью генерировать парные сигналы с регулируемой задержкой между ними и резко сниженным шагом перестройки частоты. При том же шаге перестройки частоты, что и в известных аналогах, появляется возможность существенно сократить информационную емкость постоянного запоминающего устройства и, следовательно, сложность устройства в целом.

**Выводы.** Предложены новые технические решения синтезаторов сигналов с прямым цифровым синтезом, отличающиеся расширенными функциональными возможностями и высокой точностью установки частоты с высоким разрешением. Применение

предложенных схем генераторов позволяет повысить точность проводимых с их помощью измерительных процедур, допускающих управление по цифровому интерфейсу, а также при заданной точности установки частоты упростить устройство, уменьшить разрядность применяемых цифровых узлов и емкость памяти постоянного запоминающего устройства.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство. Пер. с нем. М.: Мир, 1982. – 512 с.
2. Дьяконов, В.П. Современные измерительные генераторы сигналов. – / В.П. Дьяконов. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 384 с.
3. Нефедов, В.И. Электрорадиоизмерения : учебник / В.И. Нефедов, А.С. Сигов, В.К.Битюков, Е.В. Самохина ; под ред. А.С. Сигова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: ФОРУМ : ИЕФРА-М, 2018. – 383 с.
4. Дьяконов, В.П. Генерация и генераторы сигналов / В.П. Дьяконов. – М.: ДМК Пресс, 2009. – 384 с.
5. Шахтарин Б.И. и др. Синтезаторы частот: Учебное пособие / Б.И. Шахтарин, Г.Н. Прохладин, А.А. Иванов, А.А. Быков, А.А. Чечулина, Д.Ю. Гречищев. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 128 с.
6. Макаренко, В. Синтезаторы частоты прямого цифрового синтеза / В. Макаренко // Электронные компоненты и системы. – 2004. – № 1(77). – С. 3 – 7.
7. Vankka J., Halonen K. Direct digital synthesizers. theory, design and applications. – Boston: Kluwer Academic, 2001.
8. Jouko Vankka. Direct Digital Synthesizers: Theory, Design and Applications. Dissertation for the degree of Doctor of Science in Technology. Helsinki University of Technology. – 2000. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL [https://www.researchgate.net/publication/27515907\\_Direct\\_Digital\\_Synthesizers\\_Theory\\_Design\\_and\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/27515907_Direct_Digital_Synthesizers_Theory_Design_and_Applications) (дата обращения 26.08.2022).
9. Левин В.А. Малиновский В.Н. Романов С.К. Синтезаторы частот с системно-импульсной фазовой автоподстройкой. – М.: Радио и связь, 1989. – 232 с.
10. Манассевич В. Синтезаторы частот (Теория и проектирование): Пер. с англ. / Под ред. А.С. Галина. – М.: Связь, 1979. – 384 с.
11. Синтезатор частот. Патент РФ № 2597477, МПК H03L 7/16. Опубл. 10.09.2016 / Сочнев И.В.
12. Широкополосный синтезатор частот. Патент РФ №

2710299, МПК H03L 7/00. Оpubл. 25.12.2019 / Каширин А.Ф.

13. Синтезатор частот. Авт. свид. СССР № 785943, МПК H03B 21/02. Оpubл. 07.12.1980 / Усачев И.П., Шлянкевич Б.И., Хорещкий Н.М., Богданов А.Е.

14. Direct digital synthesis (DDS) phase locked loop (PLL) frequency synthesizer and associated methods. US Patent № 7250823, МПК H03L 7/00. Date of Patent: Jul. 31, 2007 / Nicholas Paul Shields.

15. Синтезатор частот. Патент РФ № 2003227, МПК H03L 7/18. Оpubл. 15.11.1993 / Козлов В.И.

16. Tierney J. A digital frequency synthesizer / J. Tierney, C. Rader, B. Gold // IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics. – March 1971. – Volume 19, Issue 1. – P. 48 – 57.

17. Ibrahim, S.H. High speed direct digital frequency synthesizer with pipelining phase accumulator based on Brent-Kung adder / S.H. Ibrahim, S.H.M. Ali, M.S. Islam // ICSE, – 2012. – P. 547 – 550.

18. De Caro, D. High-performance direct digital frequency synthesizers in 0.25 mm CMOS using dual-slope approximation / D. De Caro, A.G.M. Strollo // IEEE J. Solid-State Circuits. – Nov. 2005. – Vol.40, No.11. – P. 2220 – 2227.

19. Стешенко, В. Школа схемотехнического проектирования устройств обработки сигналов. Занятие 17. Цифровые синтезаторы прямого синтеза частот / В. Стешенко // Компоненты и технологии. – 2002. – № 7. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL [https://kit-e.ru/wp-content/uploads/2002\\_07\\_130.pdf](https://kit-e.ru/wp-content/uploads/2002_07_130.pdf) (дата обращения 26.08.2022).

20. Alan Bensky. Short-range Wireless Communication (Third Edition). Chapter 5 – Signal generation and transmitters. – 2019, – P. 129 – 147 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128154052000051#!> (дата обращения 26.08.2022).

21. Huang, L. The design of a wide bandwidth time marker generator / Lei Huang, Shulin Tian, Ke Liua, Guangkun Guo, Yindong Xiao, Wenhao Zhao, Xing Yang // Review of Scientific Instruments. – 2018 – N 89.

22. Рибико, Л. DDS: прямой цифровой синтез частоты / Л. Рибико // Компоненты и технологии. – 2001. – № 7. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL [http://www.compitech.ru/html/cgi/arhiv/01\\_07/stat\\_50.htm](http://www.compitech.ru/html/cgi/arhiv/01_07/stat_50.htm) (дата обращения 31.07.2022).

23. Сумматор с переменным модулем сложения. Патент РФ 2183347. МПК G06F 7/50, опубл. 10.06.2002 / Чулков В.А.

24. Генератор двухфазных гармонических сигналов. Патент РФ 2737004, МПК H03B 27/00, опубл. 24.11.2020 / Фатин В.Н., Арбузов В.Н., Бабнев С.Е., Шилов А.В.

25. Двухфазный генератор гармонических сигналов. Авторское свидетельство СССР 1084941, МПК H03B 27/00, опубл. 7.04.1984 / Колбин В.А.

26. Двухфазный генератор гармонических сигналов. Патент РФ 2761109, МПК H03B 7/00, опубл. 06.12.2021 / Фатин В.Н., Гуськов В.И., Кирсанов К.С.

27. Цифровой синтезатор многофазных сигналов. Патент РФ 2423782, МПК H03L 27/00, опубл. 10.07.2011 / Рябов И.В., Дедов А.Н., Юрьев П.М.

*Статья поступила в редакцию 25.08.2022*

*Статья принята к публикации 16.09.2022*

УДК 001.51:004.5, 005.5:004.9

DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0034

## МОДИФИКАЦИЯ СТРАТЕГИИ РАЗВИТИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПЛАНИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ПОЛИТИКИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СУВЕРЕНИТЕТА

© Автор(ы) 2022

SPIN: 6438-1418

AuthorID: 752554

ORCID: 0000-0001-9380-0987

ScopusID: 57204457721

**ЕРЖЕНИН Роман Валерьевич**, кандидат экономических наук, генеральный директор  
ООО «НПЦ ГОСУЧЕТ»

(143441, Московская область, Красногорский р-н, 69 км МКАД, п/о Путилково,  
ООК ЗАО «Гринвуд», стр. 19, e-mail: [erzhenin@gmail.com](mailto:erzhenin@gmail.com))

**Аннотация.** Изучение влияния антироссийской санкционной политики и других ограничительных мер на архитектуру экономических информационных систем (ИС), является одним из актуальных направлений современных исследований. Целью статьи является расширение области знаний о процессе развития сложной информационной системы стратегического планирования за счет создания описания отдельных характеристик новой гибридной модели развития с мобилизационным уклоном. Предварительно уточнены такие ключевые определения, как «мобилизация», «мобилизационность», «технологический суверенитет», «административно-командная система» и «директивность планирования». Модель деятельности по стратегическому планированию представлена на основе принципов системного подхода в виде ИС организационно-технического типа, что позволило сравнить две системы: современную, организованную в АНО «Аналитический центр при Правительстве РФ» с предшествующей ей – мобилизационной, организованной в Главном вычислительном центре Госплана СССР. В результате проведенного анализа выявлены принципиальные различия в деятельности по планированию, по организации планирования и в принципах внедрения информационно-коммуникационных технологий, что позволило обозначить различные характеристики среды развития информационных систем. Автором сформированы описания мобилизационной, инновационной и гибридной модели развития, обозначены драйверы мобилизационности и импортозамещения, активно влияющие на современную архитектуру ИС. Предложены новые методологические положения для стратегического управления современной ИС в сфере госуправления, учитывающей новые приоритеты политики обеспечения технологического суверенитета. В заключении автором предложен тезис о смене парадигм управления развитием отечественных ИС, когда за государством закрепляется роль контролёра за ИТ-ресурсами и роль архитектора суверенного ИТ-ландшафта.

**Ключевые слова:** моделирование; нормативная методология, архитектура системы; драйверы изменений; мобилизация; планирование; директивность; санкции.

## MODIFICATION OF THE PLANNING INFORMATION SYSTEM DEVELOPMENT STRATEGY UNDER THE CONDITIONS OF THE TECHNOLOGICAL SOVEREIGNTY POLICY

© The Author(s) 2022

**ERZHENIN Roman Valerievich**, phd in Economic Sciences, general director  
LLC "SPC GOSUCHET"

(143441, Moscow region, Krasnogorskiy district, 69 km of MKAD, Putilkovo p / o, office and public complex  
of CJSC "Greenwood", p. 19, e-mail: [erzhenin@gmail.com](mailto:erzhenin@gmail.com))

**Abstract.** The study of the impact of the anti-Russian sanctions policy and other restrictive measures on the architecture of economic information systems (EIS) is one of the current areas of modern research. The purpose of the article is to expand the field of knowledge about the process of developing a complex information system of strategic planning by creating a description of the individual characteristics of a new hybrid development model with a mobilization bias. Such key definitions as “mobilization”, “mobilizability”, “technological sovereignty”, “administrative-command system” and “directiveness of planning” have been preliminary clarified. The model of strategic planning activities is presented on the basis of the principles of a systematic approach in the form of an IS of an organizational and technical type, which made it possible to compare two systems: a modern one, organized in the ANO "Analytical Center under the Government of the Russian Federation" with its predecessor - a mobilization one, organized in the Main Computing Center of the State Planning Committee of the USSR. As a result of the analysis, fundamental differences were identified in planning activities, in organizing planning and in the principles of implementing information and communication technologies, which made it possible to identify various characteristics of the information systems development environment. The author formed descriptions of the mobilization, innovation and hybrid development models, identified the drivers of mobilization and import substitution that actively influence the modern architecture of IS. New methodological provisions are proposed for the strategic management of modern IS in the field of public administration, taking into account the new priorities of the policy of ensuring technological sovereignty. In conclusion, the author proposes a thesis about changing the paradigms of managing the development of domestic IS, when the state is assigned the role of

a controller of IT resources and the role of an architect of a sovereign IT landscape.

**Keywords:** modeling; normative methodology, system architecture; drivers of change; mobilization; planning; directiveness; sanctions.

*Для цитирования:* Ерженин Р.В. Модификация стратегии развития информационной системы планирования в условиях политики обеспечения технологического суверенитета / Р.В. Ерженин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022. – Т. 11. – № 3(59). – С. 81-87. – DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0034.

**Ведение.** Одним из наиболее обсуждаемыми в условиях введенных против России санкций и других ограничительных мер стали вопросы обеспечения технологического суверенитета [1] и перехода к кибернетическим моделям управления [2]. Как следствие, все актуальным становятся дискуссии вокруг новых моделей планирования [3-5], где применение экономической кибернетики в качестве государственной доктрины планирования, может стать одним из эффективных средств развития гибридной модели управления, включающей как расширяющие в последние годы свое присутствие мобилизационные механизмы, [6], так и рыночные механизмы, от которых правительство пока не намерено отказываться [7].

Очевидно, что функционирование любой современной экономической деятельности напрямую зависит от возможностей электронно-вычислительной техники и информационных систем, использование которых стало неотъемлемой частью принятия решений в государственном управлении. В данной статье фокус в основном сосредоточен на экономической информационной системе стратегического планирования, т.к. именно здесь находится предмет нашей профессиональной компетенции. В целом же, сам переход от инновационного типа развития к новой архитектуре мобилизационного управления представляет особый научный интерес, поскольку мобилизационная модель управления в условиях национальных угроз была опробована в нашей стране не раз, и порой относительно с неплохими результатами, а вот модель, где ее системообразующим элементом является информационная технология, как предмет национальной уязвимости, нам еще предстоит испытать на деле.

В тоже самое время, мы отчетливо понимаем, что на выбранном в качестве примера сегменте управленческой деятельности дело не заканчивается, влияние сдвигов в экономическом и социальном пространстве предполагает развёртывание широкого спектра институциональных изменений, которые существенно повлияют на развитие всех системообразующих информационных систем, в том числе и в сфере государственного управления.

**Методология.** Характеристики профессиональной управленческой деятельности, в том числе, где принимаются стратегические решения, могут быть описаны через принципы системного подхода, достаточно часто используемого различными исследователями [8-11] для изучения деятельности с использованием ИКТ. В данной работе деятельность

по стратегическому планированию предлагается рассматривать как отдельную информационную систему класса организационно-технических систем (ОТС) – человеко-машинных систем, в которых организационная подсистема (персонал) и техническая подсистема (оборудование, инженерные сети и т.п.) взаимодействуют для достижения поставленных целей [12].

Подобный подход позволит более предметно изучить сходства и различия двух ОТС стратегического планирования – мобилизационной – советской на базе Главного вычислительного центра (ГВЦ) Госплана СССР и ОТС его приемника [13] – Аналитического центра при Правительстве Российской Федерации (далее – АНО АЦ), который отвечает за информационно-аналитическое и экспертно-аналитическое обеспечение деятельности правительства. Несмотря на принадлежность изучаемых моделей ИС к различным эпохам, основная задача стоит в выделении тех особенностей в ИТ-политики, которые как раз и смогут отразить необходимые характеристики мобилизационного управления, активно влияющие на развитие современной ИС планирования.

*Целью* статьи является расширение области знаний о процессе развития сложной информационной системы стратегического планирования в условиях усиления мобилизационных методов управления экономикой, формирующихся под воздействием новых угроз нацбезопасности и новой политики обеспечения технологического суверенитета. Для достижения поставленной цели, в первую очередь, решается задача уточнения и выбора терминосистемы исследования, которая в дальнейшем используется для описания моделей развития ИС стратегического планирования.

*Терминсистема.* В современной литературе существует большой разброс мнений относительно того, что же понимается под термином «мобилизационная экономика». Исходя из обобщённых взглядов на экономику мобилизационного типа в работах [6,14-17] можно заключить, что «ключевым в большинстве определений является контроль государства над важнейшими ресурсами страны, обобществление и огосударствление экономики». В этом направлении также важно уточнить определения терминов «мобилизационность» и «мобилизация».

*Мобилизация* – это приведение в движение, активизация всей хозяйственной жизни [16].

*Мобилизационность* – это важный признак всех живых систем [15], подобная система, сталкиваясь с

угрозой существования мобилизует все резервы всех внутренних систем для противостояния угрозе. Для России мобилизационность это поистине «судьба», считает В.В. Седов [14] и связано это с рядом факторов, имеющих отношение к уникальным территориально-географическим и природно-климатическим особенностям страны, а также ее исторической и культурной составляющих. К этому следует добавить мнение А.Г. Фронтава, согласно которому для России традиционно был характерен мобилизационный тип развития общества в отличие от западных стран, развивающихся по инновационному типу [17]. А.О. Недосекин и Е.И. Рейшахрит считают, что примеры мобилизационной управленческой политики можно найти у многих русских царей [15], например, у Ивана Грозного и у Петра I, и некоторых других правителей, каждому из которых пришлось в свое время противостоять различным угрозам существованию государства.

*Технологический суверенитет* – способность государства обеспечить научно-техническое и промышленное развитие для создания и поддержания на своей территории собственных технологий и инфраструктуры, достаточных для того, чтобы гарантировать независимость своей политики, экономики и обороноспособности от иностранных технологий в критических, жизненно важных сферах [18].

*Административно-командная система (АКС)* мобилизационной экономики широко использовалась как в СССР [16], так и в странах восточной Европы, и ряде азиатских государств. В подобной системе распространены в основном два вида координации: бюрократическая и агрессивная [19], возможно поэтому первую модель АКС СССР 30-х годов называют военно-феодалный социализм или социализм казарменного типа [20]. Административно-командная и рыночная экономика – это два разных режима, которые по-разному действуют на развитие государства и жизнь социума. Для первой основной чертой является директивное планирование и выглядит это как пирамида, в которой приказы идут сверху, т.е. это означает, что все организации и предприятия должны действовать в соответствии с плановыми заданиями правительственного аппарата.

*Централизованно-директивное планирование (ЦДП)* являлось неотъемлемой частью АКС. По мнению некоторых авторов [21], директивное планирование – это разработка советских экономистов, которым удалось впервые применить этот подход столь масштабно на модели мобилизационной экономики большой страны. Методология ЦДП включала ряд важных этапов и методов: прогнозирование хозяйственного развития; планирование среднесрочных и долгосрочных задач; анализ исполнения планов; методы учета и оптимизации. ЦДП базировалось на широкой статистической информации, в том числе на нормативах расходов, показателях потребления и технологических процессов, на балансах производственных мощностей и т.п. Для обработки значительного объема экономической

информации при Госплане СССР в 1959 году был создан ГВЦ Госплана СССР, который стал не только ведущим научно-производственным центром планирования социалистической экономики, но и лидером в области автоматизации решения задач планирования экономики [22-23].

**Результаты.** *Принципы планирования.* Изучая поставленные цели перед рассматриваемой ИС, в первую очередь, необходимо обратить внимание на основные принципы планирования. Так, Госплан придерживался *директивного планирования*, наиболее характерного для административно-командной системы, централизованного управления в условиях мобилизационно экономики. Как было рассмотрено в первом разделе, директивное планирование – это процесс принятия решений, имеющих обязательный характер для объектов планирования, в тоже самое время, этому типу планирования было характерны и ряд «пороков»: малая эффективность государственного сектора; иждивенчество и инертность; подрыв естественных (присущих человеческой природе) рыночных законов и т.п.

В современной модели управления экономикой АНО АЦ практикует *индикативное планирование*, т.е. это преимущественно государственное планирование, которое носит в разной степени направляющий, рекомендательный характер. В целом, индикативное планирование не имеет однозначных форм - в одних странах это государственное планирование при сохранении самостоятельности предприятий, в других – это информационное ориентирование частных предприятий и стимулирование их к выполнению задач, формулируемых государством, или это может быть и индикативный план, как механизм равноправного взаимодействия государственных институтов и хозяйствующих субъектов.

Директивные планы, как правило, имеют адресный характер и отличаются чрезмерной детализацией. В тоже самое время и индикативное планирование также опирается на существенное количество показателей-индикаторов, т.е. использование вычислительной техники для обеих моделей в современных условиях становится обязательным, особенно если речь идет о высоком качестве планирования и необходимости детализации параметров управления. В случае «директивности» детальные показатели нужны в большей мере для контроля исполнения планов, а случае «индикативности» детальные параметры-индикаторы необходимы для мониторинга результатов деятельности.

*Принципы организации процесса планирования.* Как было рассмотрено ранее, ГВЦ являлся неотъемлемой частью Госплана СССР, т.к. по сути выполнял роль «вычислительной машины», где осуществлялись расчеты, необходимы для разработки стратегически важных директив, которые по существу и обеспечивали сбалансированное функционирование мобилизационной экономики развитого Советского Союза. Очевидно, что ГВЦ Госплана – это

наиважнейшая часть механизма принятия решений по управлению ресурсами и продукцией.

Если же обратить внимание на роль АНО АЦ в стратегическом планировании современной России, то результаты их деятельности в большей мере носят рекомендательный характер, в то время как директивность административно-командной системы являлась предписанием для обязательных действий. Задачи АНО «связаны с поиском альтернативных ответов на неприятные вопросы, оценкой эффективности, опросами мнений и так далее», указывает в своем интервью руководитель Аналитического центра – В. Онищенко [24]. Наряду с АНО похожие рекомендации формируют Счетная палата, Общероссийский народный фронт, Федеральная служба охраны, ВЦИОМ и другие государственные органы и общественные организации.

Принципы развития и внедрения информационно-коммуникационных технологий. Очевидно, что прямое сравнение двух ИТ-ландшафтов из разных эпох является не совсем корректным, однако выделить ключевые тенденции в развитии информационных технологий в ГВЦ Госплана и АНО АЦ считаем принципиально важной задачей, с учетом заявленной в данной статье цели. Так, собранные позволяют сделать заключение о явной тенденции развития советской электронной радиопромышленности, результатом стало появление в ГВЦ Госплана отечественных ЭВМ (Урал, ЕС, Искра) позволяющих с каждой новой моделью расширять возможности использования директивного планирования, в том числе и за счет развития новых научных методов планирования, например, известно на весь мир балансового метода. Помимо создания отечественных вычислительных машин, государство выделяло и валютные средства на закупку зарубежной техники (Эмидек, Эллиот и т.п.), что также усиливало и расширяло возможности ГВЦ.

Явная тенденция развития отечественного программного обеспечения в советском периоде отражается на примере создание крупномасштабной Автоматизированной системы плановых расчётов (АСПР), как подсистемы еще более масштабной системы – Общегосударственной автоматизированная системы учёта и обработки информации (ОГАС). Вообще, это был беспрецедентный в истории нашего государства интеллектуальный прорыв в создании национальных ИС, в котором участвовали тысячи ученых, инженеров и изобретателей.

Переключив внимание на последователей ГВЦ, можно выяснить, что вычислительной техники и средств коммуникаций, разработанных на отечественных производственных площадках, в закупках АНО АЦ не значится. Собственно, это типичная картина засилья зарубежной электронной компонентной базы во всех отраслях экономики и управления. К сожалению, и на «фронте» развития отечественного программного обеспечения АНО АЦ не демонстрирует стремления к импортозамещению:

преимущественно приобретается зарубежное программное обеспечение (*SAP, IBM, Microsoft, Adobe, Tobii, Noldus Information Technology, Veeam Software, VMware, Synology* и т.п.), исключением являются ряд российских компаний, в том числе и тех, кто на протяжении нескольких последних лет находится под санкциями США, например, группа компаний *Positive Technologies*, которая занимается созданием решений в области информационной безопасности.

Если же сконцентрировать внимание на базовую экспертно-аналитическую деятельность АНО АЦ, то здесь используются так называемые *BI*-системы, в частности *Boardroom Insiders*, т.е. это те приложения, которые, по сути, преобразуют информацию из разных источников в удобную и понятную аналитику за счет использования конструктор форм и специальных панелей с визуализацией данных.

Несмотря на обилие на сайте АНО АЦ различного информационно-аналитического материала по вопросам цифровизации, управлению на основе данных, по развитию искусственного интеллекта и другим ИТ-направлениям, нам не удалось найти и следов от комплаенс-ИТ-политики, как свода правил и документов, из которых можно было извлечь основные ценности АНО, связанные с национальными ИТ-приоритетами, в том числе в области импортозамещения и информационной безопасности. Учитывая отсутствие каких-либо документов, имеющих отношение к ИТ-политике, также не удалось установить использует ли АНО в своей деятельности федеральную информационную систему стратегического планирования и мониторинга национальных целей развития ГАС «Управление» и агрегирующий сведения о государственных программах и их структурных элементах ГИИС «Электронный бюджет».

К этому следует добавить, что помимо указанных информационных систем стратегического планирования, в планах Минэкономразвития создать еще одну – более масштабную – единую цифровую платформу «Экономика», которая будет мониторить, моделировать и прогнозировать социально-экономическое развитие страны, а также отслеживать эффективность реализованных субсидий и мер поддержки [25]. Насколько она будет коррелирована с деятельностью АНО АЦ, будет ли она интегрирована с закупленными ранее АНО зарубежными *BI*-системами – вопросы, на которые не удалось пока найти ответа.

**Обсуждение.** Полученные результаты сравнительного анализа информационных систем стратегического планирования позволяют охарактеризовать три основные модели развития:

1) советская мобилизационная модель развития (ММР) строилась в условиях дефицита основных ресурсов на монолитной структуре административно-командной системы, в которой в качестве монопольного субъекта управления распределением ресурсов, а также управлением развития методологии

создания и внедрения ИС выступало исключительно государство;

2) инновационная модель развития (ИМР), где доминируют экономические факторы в системе факторов развития и преобладают зарубежные информационные технологии. Предпосылками формирования этой модели стали проводимые системные реформы, активное влияние ведущих зарубежных вендоров на российскую ИТ-политику и ИТ-образование, а также отсутствие значимых национальных угроз, «хрономерный, соразмерный по темпу естественным импульсам и органическим потребностям характер экономического и политического развития» [26];

3) новая гибридная модель развития (ГМР), в которой по-прежнему доминируют экономические факторы развития, при этом парадигма управления развитием ИС формируется в условиях нарастающего дефицита кадровых ИТ-ресурсов и, одновременно, в условиях новой политики ответа на возникшие угрозы нацбезопасности.

К ключевым драйверам изменений архитектуры ИМР и переходу к ГМР ИС с характеристиками ММР следует отнести следующие:

1) драйверы мобилизационности: внешние угрозы и внутренние факторы, сдвигающие управление в сторону мобилизации, т.е. факторы, кардинально влияющие на планы и цели предприятий [27,28], и, как следствие, изменяющие цели и задачи, стоящие перед ИС планирования, а также корректирующие деятельность людей, структуру параметров (индикаторов) управления и планирования (архитектуру

информации);

2) драйверы импортозамещения: внешние силы и внутренние факторы, критически влияющие на ИТ-отрасль, и стимулирующие процессы импортозамещения в сферах разработки различных программных систем, производства электроники, вычислительной техники и средств коммуникаций.

Следует заметить, что указанные драйверы изменений кардинально отличаются от традиционных драйверов-развития архитектуры ИС, в большинстве своем придающих стимулы к запуску процессов повышения эффективности функционирования [29-30]. Таким образом новые драйверы можно назвать драйверами развития приоритетов национальной безопасности, которые, возможно, станут выше приоритетов качества и эффективности.

**Выводы.** Можно предположить, что сдвиг политики управления развитием сложных ИС от рыночных приоритетов к политике обеспечения технологического суверенитета еще больше обострит проблему неразвитости нормативной методологии стратегического управления сложных государственных ИС.

Подобная директивная методология, по-нашему мнению, должна включать в себя не только теоретические принципы и методы, используемые в процессе управления развитием ИС, но и также обеспечивать строгое единство системы методов моделирования и методов экспертной оценки, специфических методологических принципов, отвечающим положениям новой инновационно-мобилизационной стратегии развития ИС (рис. 1).



Рисунок 1 – Единство стратегии, методологии и экспертирования

Следует заметить, что развитие подобной методологии, как совокупности набора процедур, обеспечивающих получение единообразного и достоверного эмпирического материала, позволит накапливать высокоспециализированное методологическое знание об управлении сложной ИС. Таким образом, будущее любой сложной ИС, в том числе рассматриваемой в данном исследовании ИС стратегического планирования, должно зависеть не от того, насколько удачным будет эксперимент по ее созданию, а от того насколько эффективно будет решаться сложная научная задача по формированию методологического знания, включающая как задачу по выделению знания о моделировании ИС, так и задачу по выделению знания об этом знании [31]. Подобная постановка задачи особенно актуально звучит для мобилизационного типа управления, т.к. именно здесь преобладают директивные методы, для которых особенно востребовано указанное высокоспециализированное методологическое знание, т.к. в силу присущих ему функций непосредственной регламентации научно-исследовательской деятельности оно всегда носит четко выраженный нормативный характер [32].

К вышеуказанному также следует добавить, что проведенное исследование влияния окружающей среды на модель ИС стратегического планирования позволило не только расширить область знаний о процессе ее развития, но и, одновременно, выявить нарастание ряда противоречий в системе институциональных отношений. Можно предположить, что подобные противоречия, существующие в плоскости противоречий между государственными и корпоративными интересами, обострились не только от кардинального сдвига приоритетов в сторону мобилизации и технологического суверенитета, но и от нарастания дефицита кадровых ИТ-ресурсов, оцениваемого в 1 млн. человек [33].

В этих непростых условиях инновационная модель управления развитием ИТ-отрасли, где система отношений между государством и отечественным ИТ-бизнесом все эти годы выстраивалась в рамках равноправных партнеров, начинает проигрывать системе отношений мобилизационного типа управления, где интересы государства постепенно становятся выше интересов ИТ-компаний. Ведущая роль государства во взаимоотношениях с ИТ-бизнесом все больше будет склоняться к советской модели или модели Ирана, в которой отсутствуют конкурентоспособные ИТ-продукты, т.е. приоритет в системе факторов развития отечественной ИТ-индустрии будет отдан не экономическим факторам. Кроме этого, возможно массированное использование директивности и мер принуждения в качестве компенсаторного механизма [26], необходимого для восполнения дефицита ИТ-ресурсов и для решения приоритетных задач государства.

Очевидно, что у подобной модели формирование разнообразных механизмов влияния ИТ-сообщества

на государственную ИТ-политику будет снижаться, а роль государства, как контролера за ИТ-ресурсами и, одновременно, как субъекта строительства суверенного ИТ-ландшафта – будет усиливаться. Таким образом текущий период можно назвать временем смены парадигмы: если до последнего времени ИТ-сообщество строило российское информационно-электронно-цифровое государство, то сейчас государство приступает к формированию новой архитектуры суверенной ИТ-индустрии в условиях деглобализации российской экономики и деинтеграции с мировым рынком науки и технологий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Дмитрий Песков. Почему для России важен технологический суверенитет. Режим доступа: <https://www.rbc.ru/newspaper/2022/06/10/62a0e95b9a79472d8b713207> (дата обращения: 15.05.2022).
2. Власти объяснили, почему возврат к Госплану в России невозможен. Режим доступа: [https://www.rbc.ru/economics/13/05/2022/627e0cae9a79476c07e97dde?from=from\\_main\\_1](https://www.rbc.ru/economics/13/05/2022/627e0cae9a79476c07e97dde?from=from_main_1) (дата обращения: 15.05.2022).
3. Валентин Катаонов. Экономическое чудо. Режим доступа: <https://sovross.ru/articles/2254/56688> (дата обращения: 15.05.2022).
4. Александр Широков. Новая парадигма развития. Режим доступа: [https://expert.ru/expert/2022/19/novaya-paradigma-razvitiya/?ny=&utm\\_source=yxnews&utm\\_medium=desktop](https://expert.ru/expert/2022/19/novaya-paradigma-razvitiya/?ny=&utm_source=yxnews&utm_medium=desktop). (дата обращения: 15.05.2022).
5. Глазьев С.Ю. Нас «раскатали». И это будут делать, пока мы не возродим планирование. Режим доступа: <http://www.pakanune.ru/articles/110195/> (дата обращения: 15.05.2022).
6. Мартыненко Т. В. Мобилизационная экономика: актуальна ли она для современной России? / Т. В. Мартыненко // Государственное и муниципальное управление. Ученые записки. 2021. № 1. С. 151-155. DOI 10.22394/2079-1690-2021-1-1-151-155.
7. Стенограмма: Отчет Михаила Мишустина в Госдуме о работе правительства. Режим доступа: <https://rg.ru/2022/04/07/stenogramma-otchet-mihaila-mishustina-v-gosdume-o-rabote-pravitelstva.html> (дата обращения: 15.05.2022).
8. Large-Scale Complex IT Systems. Development, Operation and Management / Editors: R. Calinescu, D. Garlan (Eds.). 17th Monterey Workshop 2012. Oxford, UK, March 19–21, 2012.
9. Цветков В. Я. Основы системного подхода при анализе информационных систем / В. Я. Цветков // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2001. № 2. С. 156-161.
10. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир, 1973. 344 с.
11. Von Bertalanffy L. General System Theory (Foundation, Development, Application) / L. Von Bertalanffy. N.-Y., 1973.
12. Запорожцев А.В. Принципы проектирования организационно-технических систем. Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 3 (100). С. 106-115.
13. Пионеры цифровизации. Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации. Режим доступа: [https://ac.gov.ru/uploads/pdf/About\\_Documents\\_01/60\\_let\\_web.pdf](https://ac.gov.ru/uploads/pdf/About_Documents_01/60_let_web.pdf) (дата обращения: 15.05.2022).
14. Седов В.В. Мобилизационная экономика: советская модель / Челяб. гос.ун-т. Челябинск, 2003. 177 с.
15. Недосекин А.О. Мобилизационная экономика порусски / А.О. Недосекин, Е.И. Рейшахрит. СПб: Изд-во Политехн. университета, 2015. 124 с.
16. Черемисинов Г. А. Столетие мобилизационного развития российской экономики // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Экономика. Управление. Право. 2017. Т. 17, вып. 4. С. 368–389. DOI: 10.18500/1994-2540-2017-17-4-368-389.
17. Фронтов А.Г. Россия: от мобилизационного общества к инновационному. М., 1993.
18. Александр Лосев: Ядерная энергетика и технологический суверенитет. Совет по внешней и оборонной политике (СВОП). Режим доступа: <http://svop.ru/main/26081/> (дата обращения: 15.05.2022).

19. Анаева З.К. Особенности административно-командной системы / З.К. Анаева, Р.И. Асабаева // Современные проблемы гуманитарных и естественных наук: материалы XXXI международной научно-практической конференции, Москва, 22–23 ноября 2016 года / Научно-информационный издательский центр "Институт стратегических исследований". Москва: Научно-информационный издательский центр "Институт стратегических исследований", 2016. С. 66-70.
20. Рассказов Л.П. Карательные органы в процессе формирования и функционирования административно-командной системы в советском государстве (1917-1941 гг.): / Л. П. Рассказов. Уфа: Академия МВД РФ. Уфимская высшая школа МВД Российской Федерации, 1994. 465 с.
21. Директивное планирование – это... Определение понятия, особенности, применение на практике. Режим доступа: <https://fin-az.ru/423074a-direktivnoe-planirovanie---eto-opredelenie-ponyatiya-osobennosti-primenenie-na-praktike> (дата обращения: 15.05.2022).
22. Иванов Е.А. Госплан СССР: попытка воплотить в жизнь великую мечту / Е.А. Иванов // Экономическая наука современной России. 2010. № 4(51). С. 115-130.
23. Китов В. А. Страницы истории главного вычислительного центра Госплана СССР / В.А. Китов, А.В. Сафронов // Цифровая экономика. 2019. № 1(5). С. 17-24.
24. Владислав Онищенко. Глава Аналитического центра при правительстве РФ: мы ищем ответы на неприятные вопросы. Режим доступа: <https://tass.ru/interviews/6135883>. (дата обращения: 09.05.2022).
25. Минэк создаст ИТ-систему по «моделированию» экономического развития. Режим доступа: <https://www.rbc.ru/economics/05/05/2022/627266659a7947138b2f0e5e> (дата обращения: 15.05.2022).
26. Гаман-Голутвина О.В. Российские политические элиты: факторы эволюции // Элитизм в России: за и против: Сборник материалов интернет-конференции, Пермь, 01 февраля – 30 2002 года / Под общей редакцией В. П. Мохова. Пермь: Пермский государственный технический университет, 2002. С. 65-92.
27. Kossiakoff A., Sweet W. N., Seymour S. J., Biemer S. M. Systems Engineering Principles and Practice. Hoboken, New Jersey: A John Wiley & Sons, 2011. 599 с.
28. CIO Council. Federal Enterprise Architecture Framework. Version 1.1, 1999 September.
29. IIC. The Industrial Internet of Things. Volume G1: Reference Architecture. IIC:PUB:G1:V1.80:20170131. Режим доступа: [https://www.iiconsortium.org/IIC\\_PUB\\_G1\\_V1.80\\_2017-01-31.pdf](https://www.iiconsortium.org/IIC_PUB_G1_V1.80_2017-01-31.pdf) (дата обращения: 15.05.2022).
30. The Pillars of Enterprise Architecture Terminology, Giga, 2002.
31. Ерженин Р.В. Онтологический подход к представлению знаний о методологии моделирования сложной системы управления / Р.В. Ерженин, Л.В. Массель // Онтология проектирования. – 2020. – Т. 10, №4(38). - С. 463-476. – DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-4-463-476.
32. Юдин Э.Г. Системный подход и принцип деятельности: Методологические проблемы современной науки / Юдин Э.Г. // М.: Наука, 1978.
33. Морозова О.И., Семенихина А.В. Проблемы кадрового дефицита в условиях цифровой экономики // МНИЖ. 2020. №6-4 (96).

*Статья поступила в редакцию 26.07.2022*

*Статья принята к публикации 16.09.2022*

УДК 53.06, 633.111.1, 664.7

DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0013

## ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ МАЛЫХ ДОЗ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ПРОРАЩИВАНИЯ ПШЕНИЦЫ

© Автор(ы) 2021

SPIN: 7663-1784

Author ID: 450578

ORCID: 0000-0002-4777-1465

ResearcherID: C-3922-2018

ScopusID: 57203766629

**ТИМАКОВА Роза Темерьяновна**, доктор технических наук,  
профессор кафедры пищевой инженерии

*Уральский государственный экономический университет*

(620144, Россия, Екатеринбург, улица 8 марта/Народной воли, 62/45, e-mail: trt64@mail.ru)

ORCID: 0000-0001-5581-3963

**ИЛЬЮХИНА Юлия Владимировна**, аспирант

*Уральский государственный экономический университет*

(620144, Россия, Екатеринбург, улица 8 марта/Народной воли, 62/45, e-mail: janine86@mail.ru)

ORCID: 0000-0001-9269-9717

**ИЛЬЮХИН Руслан Васильевич**, аспирант

*Уральский государственный экономический университет*

(620144, Россия, Екатеринбург, улица 8 марта/Народной воли, 62/45, e-mail: iruslan@sputniksattv.ru)

старший преподаватель кафедры безопасности информационных систем

*Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А.Бонч-Бруевича*

(192232, Россия, Санкт-Петербург, проспект Большевиков, 22 к. 1, e-mail: iruslan@sputniksattv.ru)

**Аннотация.** Технология контролируемого проращивания в результате радиостимуляции зерен пшеницы мягкой яровой сорта Л-503 позволила установить оптимальные стимулирующие дозы в пределах от 9 Гр до 13 Гр излучения. В результате проведенного исследования установлено, что применение оптимальных доз излучения обеспечивает высокую энергию прорастания через 3-е суток в результате снижения проницаемости мембран для воды, как среды для проращивания, со всхожестью в 95,7-97,0% зерен пшеницы и полностью соответствующую способности прорастания через 5 суток со всхожестью зерен 96,6-97%, пророщенные зерна пшеницы отличаются крепкими проростками длиной до 1,9 мм. При использовании для проращивания зерен пшениц через 7 суток после их обработки излучением обеспечивается пролонгированное действие малых доз стимулирующего характера по сравнению с необлученными образцами и, обеспечивая высокую всхожесть пшеницы, отличаются более низкими количественными показателями: на 0,5-0,7% для зерен, обработанных дозами 1-4 Гр, на 0,9-1,2% и на 1,0-1,7% для зерен, обработанных дозами 5-8 Гр и 9-13 Гр соответственно. Всхожесть зерен, обработанных дозами от 14 Гр до 20 Гр, снизилась на 2,4-3,2%. На 5-е сутки после проращивания зерен пшеницы, обработанных малыми дозами излучения наблюдается более интенсивное увеличение аминокислотного сора аминокислот (АКС) по сравнению с необработанными образцами на аналогичном периоде проращивания. АКС аминокислот в опытных образцах пшеницы, обработанной излучением дозой 9-13 Гр, увеличился от 0,64% по изолейцину до 8,25% по лизину. Установлены лимитирующие аминокислоты – лизин и треонин. Лучшими показателями биологической ценности отличаются обработанные оптимальными дозами излучения зерна пшеницы при проращивании до пяти суток. Исследование микробиальной обсемененности (микроорганизмы, грибная микробиота) поверхности зерен показывает поддерживающий антимикробный эффект. Для регуляции механизма ферментативной активности протеаз в зерне пшеницы после обработки малыми дозами излучения, которые влияют на энергию и способность прорастания зерен пшеницы, необходимо последовательное продолжение исследований.

**Ключевые слова:** радиостимуляция, проращивание, пророщенное зерно, ростки (проростки), всхожесть, энергия прорастания, способность прорастания, пшеница мягкая яровая сорт Л-503, излучение, доза, Гр, аминокислотный сор, аминокислоты.

## STUDY OF THE EFFECT OF LOW RADIATION DOSES ON THE INTENSITY OF WHEAT GERMINATION

© The Author(s) 2021

**ТИМАКОВА Roza Temer'janovna**, doctor of technical sciences,  
professor of the Department of Food Engineering

*Ural State University of Economics*

(620144, Russia, Yekaterinburg, 8 Marta Street/Narodnaya Volya, 62/45, e-mail: trt64@mail.ru)

**ILIUKHINA Iuliia Vladimirovna**, phd student

Ural State University of Economics

(620144, Russia, Yekaterinburg, 8 Marta Street/Narodnaya Volya, 62/45, e-mail: janine86@mail.ru)

**ILIUKHIN Ruslan Vasilievich**, phd student

Ural State University of Economics

(620144, Russia, Yekaterinburg, 8 Marta Street/Narodnaya Volya, 62/45, e-mail: iruslan@sputniksattv.ru)

Senior lecturer of the Department of Information Systems Security

Sankt-St. Petersburg State University of Telecommunications named after Prof. M.A. Bonch-Bruевич

(192232, Russia, St. Petersburg, Bolshevikov Avenue, 22 K. 1, e-mail: iruslan@sputniksattv.ru)

**Abstract.** The technology of controlled germination as a result of radio stimulation of wheat grains of the soft spring variety L-503 allowed to establish optimal stimulating doses ranging from 9 Gy to 13 Gy of radiation. As a result of the study, it was found that the use of optimal radiation doses provides high germination energy after 3 days as a result of a decrease in the permeability of membranes for water as a medium for germination, with a germination rate of 95.7-97.0% of wheat grains and fully corresponding to the germination ability after 5 days with a germination rate of 96.6-97%, germinated grains wheat is distinguished by strong seedlings up to 1.9 mm long. When used for germination of wheat grains, 7 days after their treatment with radiation, the prolonged effect of small doses of a stimulating nature is provided in comparison with non-irradiated samples and, providing high germination of wheat, differ in lower quantitative indicators: by 0.5-0.7% for grains treated with doses of 1-4 Gy, by 0.9-1.2% and by 1.0-1.7% for grains treated with doses of 5-8 Gy and 9-13 Gy, respectively. The germination of grains treated with doses from 14 Gy to 20 Gy decreased by 2.4-3.2%. On the 5th day after germination of wheat grains treated with small doses of radiation, a more intense increase in the amino acid score of amino acids (ACS) is observed compared to untreated samples during the same germination period. The AKS of amino acids in experimental wheat samples treated with radiation dose of 9-13 Gy increased from 0.64% for isoleucine to 8.25% for lysine. Limiting amino acids – lysine and threonine - have been established. The best indicators of biological value are those treated with optimal radiation doses of wheat grains during germination for up to five days. The study of microbial contamination (microorganisms, fungal microbiota) of the grain surface shows a supportive antimicrobial effect. To regulate the mechanism of enzymatic activity of proteases in wheat grain after treatment with small doses of radiation, which affect the energy and germination ability of wheat grains, it is necessary to consistently continue research.

**Keywords:** radio stimulation, germination, sprouted grain, sprouts (seedlings), germination, germination energy, germination ability, soft spring wheat grade L-503, radiation, dose, Gy, amino acid score, amino acids.

*Для цитирования:* Тимакова Р.Т. Изучение влияния малых доз излучения на интенсивность проращивания пшеницы / Р.Т. Тимакова, Ю.В. Ильюхина, Р.В. Ильюхин// XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022. – Т. 11. – № 3(59). – С. 88-96. – DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0013.

**Введение.** В настоящее время согласно Прогнозу долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2030 года и в соответствии со Стратегией формирования здорового образа жизни населения, профилактики и контроля неинфекционных заболеваний на период до 2025 года вопросы повышения функциональной ценности пищевых продуктов в условиях широкого распространения на современном этапе фаст-фуда, рафинированной пищи и общей гиподинамии населения определяют необходимость обогащения отдельными функциональными пищевыми ингредиентами пищевые продукты, или так называемые пищевые системы, для предотвращения или восполнения имеющегося в организме человека дефицита питательных веществ и/ или собственной микрофлоры в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52349-2005.

Производство персонализированных функциональных пищевых продуктов позволяет в соответствии с потребительским спросом отдельных групп населения удовлетворять индивидуальные потребности организма человека на основе его генетического профиля и с учетом так называемых

«генов предрасположенности», связанных с усвоением определенных пищевых нутриентов [1].

Продукты переработки зерновых культур составляют основу рациона человека, начиная от муки в хлебопечении, крупяных и макаронных, кондитерских изделий и до пищевых концентратов.

В результате проводимых исследований отмечается повышение пищевой ценности зерна зерновых, крупяных, бобовых и масличных культур при его проращивании. При этом в пищу можно использовать как проростки (спраутс) и микрозелень, так и собственно пророщенное зерно в естественном и переработанном виде.

Спраутс и микрозелень в основном используют в свежем виде. Предложение микрозелени в сушеном виде обеспечивает расширение ассортимента сушеной зелени на потребительском рынке и обогащение пищевого рациона населения за счет ценных ингредиентов зелени [2].

Экспериментальными исследованиями последних лет показано, пророщенные зерна применяются для обогащения биологически активными веществами, пищевыми волокнами, витаминами и микроэлементами при разработке пищевой продукции

функционального назначения: каш [3], напитков [4], кисломолочных продуктов [5], в салатах, гарнирах, хлопьях для завтраков, мучных и сахаристых кондитерских изделиях [6], в общественном питании [7]. Установлено увеличение суммарного содержания антиоксидантов в хакасском национальном продукте талган, изготовленного из пророщенного зерна пшеницы и ячменя [8].

В последние годы наблюдается повышенный интерес к использованию муки из проросшего зерна в хлебопечении. Проращивание зерна сопровождается значительным нарастанием его антиоксидантного потенциала и замедлением прогоркания липидов продукции, отмечают [9-11]. Исследованиями ученых [12] при проращивании зерен кукурузы, пшеницы и ячменя установлено резкое увеличение содержания фенолов и аскорбиновой кислоты.

Проращивание зерна считается одним из способов, улучшающим пищевую ценность и функциональные свойства зерна. Пророщенное зерно мягкой пшеницы содержит все незаменимые аминокислоты, удовлетворяет 105% суточной потребности в марганце (из расчета на 100г пророщенного зерна), 18,1% – в меди, 17,1% – в магнии, 40,0% – в витамине (B1), 18,5% – в клетчатке, отмечают белорусские ученые [13].

По мнению [14, 15], пророщенные зерна пшеницы, являются продуктивной средой для производства дрожжевой биомассы, которая при биоконверсии углеводных субстратов увеличивает продукцию полезных микроорганизмов за счет ферментации различных растительных субстратов, в результате чего полученные продукты с пребиотическими свойствами.

Ферменты, активированные при проращивании, что приводит к увеличению их содержания, расщепляют белки, жиры и углеводы, запасенные в зерне, и переводят их в легкоусвояемую форму [3, 16].

Активизация обменных процессов в пророщенном зерне во многом определяется подбором температурно-влажностного режима, освещенности и продолжительности выращивания, выбором состава субстрата с целью формирования наиболее оптимального технологического решения: проращивание в растворе йодида калия, селена, цинка, отваров коренья и ягод, в плазмохимически активированных водных растворах [17-21], с использованием физических факторов – контроль дозы суточного искусственного освещения (оптимально использовать в течение 4 ч) [22], обработка ультразвуком [23, 24] для улучшения всхожести семян, роста ростков и повышения содержания отдельных химических нутриентов: сырого протеина, сырой клетчатки и углеводов.

Начиная с конца 20 века, одним из способов повышения биологического потенциала семян зерновых культур, как наиболее распространенных и востребованных культур, является применение методов физического воздействия, в частности ионизирующего излучения. Производственные

технологии развиваются в нескольких направлениях: первое – предпосевная подготовка для повышения всхожести семян зерновых культур и дальнейшего их роста и развития с одновременным снижением микробиологической обсемененности в АПК (при достижении симбиоза стимулирующего и ингибирующего воздействия); второе – обработка зерен зерновых культур для последующего использования зерен с проростками в качестве самостоятельных пищевых продуктов или в виде ингредиентов высокой биологической ценности при производстве разных видов пищевых продуктов в пищевой промышленности; третье, по данным [25] – использование определенных доз ионизирующего излучения для обработки сельскохозяйственного сырья растительного происхождения обеспечивает уничтожение вредителей, уменьшение обсемененности микроорганизмами и замедление созревания плодовоовощной продукции.

Исследованиями ученых устанавливаются первичные факторы активизации жизненных процессов в облученном зерне, ускорение темпов их прорастания и повышение пищевой ценности. С одной стороны, по мнению [26-28], стимуляция прорастания зерен излучением позволяет ослабить регуляторные механизмы ограничения функциональной активности зерен в состоянии метаболического покоя. С другой стороны, как отмечают [29-32], в клетках облученного зерна появляются скрытые повреждения и начинают усиливаться физико-химические процессы.

В соответствии с молекулярными механизмами роста и развития клетки выделяются в качестве основных систем геном и биомембрана, воздействие на которые излучением, ускоряет процесс биоактивации [27]. Энергия излучения преобразуется, главным образом, в свободные радикалы (рис. 1), которые вступают в реакцию с образованием сильных окислителей-гидроперекисей и радикала гидроксила при поступлении в зерна воды и кислорода [30], соответственно запускается процесс прорастания.

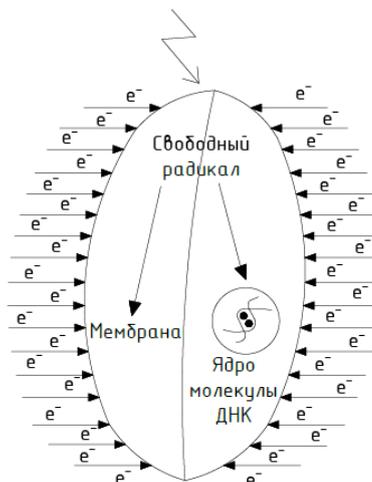


Рисунок 1 – Визуальное представление воздействия излучения на зерно

В результате активации генома происходит синтез белков и нуклеиновых кислот. При набухании семян в результате гидратации и осмоса за счет активизации ферментов жиры, белки, полисахариды преобразовываются в растворимое состояние, в результате дыхания и гликолиза осуществляется накопление АТФ и активация деления клеток зародыша, растет содержание фитогормонов, являющихся активаторами роста [33]. Аналогичного мнения придерживаются [34,35]: стимулирование прорастания на ранних стадиях связано со специфическими изменениями концентраций ключевых фитогормонов и паттернов экспрессии генов факторов метаболизма, что определяется мобильными элементами – ретротранспозонами растительного генома.

Соответственно, при облучении в стимулирующих дозах генетическая программа развития растения не меняется. В тоже время такие дозы достаточны для воздействия на регуляторные системы растения.

Анализ последних исследований показывает, что существуют данные о нестабильности стимулирующего эффекта и его модификации разными внешними и внутренними факторами. Так, по мнению [36], необходимо проводить оценку актуального диапазона стимулирующих доз для урожая разных лет, так анализ морфологических параметров проростков ячменя сорта Нур урожая 2016 года показал в качестве стимулирующей дозы 20 Гр, урожая 2017 года – 15 Гр, что может быть связано с особенностями накопления запасных белков в эндоспермах семян урожая разных лет, исходя из метеорологических условий.

По данным ВНИИРАЭ и других авторов для пшеницы стимулирующая доза гамма-излучения находится в пределах от 5 до 8 Гр, для льна 7,5-10 Гр, ячменя 10-30 Гр, просо 5-10 Гр и др. [37-39]. Исследованиями [40] установлено максимальное проявление эффекта гормезиса при проращивании зерен твердой пшеницы, облученных дозой 20 Гр. Информация предоставлена без учета сорта исследуемой продукции.

Обобщая эмпирический характер изученных результатов ранее проведенных исследований, можно отметить научно-практическую значимость исследований для формирования новой концепции повышения ценности зерновых продуктов в результате кратковременного воздействия на них малыми дозами излучения. По нашему мнению, для производства и последующего применения пророщенного зерна разных сельскохозяйственных культур в промышленных масштабах в разных отраслях пищевой промышленности необходимо проведение комплексных исследований в результате многоаспектного подхода: видовые и сортовые особенности, фактор активации и его благоприятное влияние, параметры производственного процесса, результативный фактор (ценность продукта) и др. Актуальность представленного материала

практических исследований авторов показана тем, что в ходе эксперимента установлены реперные точки, определяемые симбиотическим воздействием оптимальных доз излучения на зерна определенного сорта товарной пшеницы в минимально установленный период контролируемого проращивания для максимального повышения биологической ценности пшеницы в условиях эксперимента, что предопределяет необходимость выявления причинно-следственной связи между дозой излучения и сроками проращивания для достижений высоких результатов всхожести зерна пшеницы.

**Методология.** С учетом имеющейся информации, целью исследования является определение оптимальных стимулирующих доз излучения для радиостимуляции зерен пшеницы.

Выбор в качестве объекта исследования – пшеницы обусловлен тем, что зерно пшеницы является важнейшим сырьевым ресурсом растительного происхождения для разных отраслей пищевой промышленности в соответствии ИТС 44-2017 «Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Производство продуктов питания»: мукомольного, крупяного и макаронного производства; пивоваренной, спиртовой и хлебобулочной промышленности. Качество готового продукта зависит от качества исходного сырья и применяемых инновационных биотехнологических приемов повышения биологической ценности продукта [41].

Пшеница мягкая яровая сорт Л-503 – среднеспелый сорт, устойчив к предуборочному прорастанию, относится к ценной мягкой пшенице, по содержанию в муке желтых пигментов приближается к лучшим твердым пшеницам, выделяется повышенным содержанием в зерне белка и клейковины, распространен в Нижне- и Средневолжском, Уральском и Центрально-черноземном регионах, в Саратовской области. Зерна мягкой яровой пшеницы овальной формы, короткие, с хорошо различимой бороздкой, отличаются толщиной  $1,9 \pm 0,4$  мм, шириной  $1,6 \pm 0,5$  мм и длиной  $5,6 \pm 0,7$  мм. Масса 1000 семян –  $33,6 \pm 1,3$  г.

Сформированы контрольная и опытные группы № 1-20 (цифра обозначает дозу излучения в Гр). В каждой группе отобрано по 1000 семян. Отобранные зерна пшеницы соответствуют требованиям ТР ТС 015/2011 «О безопасности зерна», ГОСТ 9353-2016 «Пшеница. Технические условия», ГОСТ 27186-86 «Зерно заготавливаемое и поставляемое. Термины и определения».

Для активации образцы опытных групп зерен пшеницы обрабатывались дозами ионизирующего облучения от 1 Гр до 20 Гр с шагом 1 Гр с мощностью дозы 60 Гр в час при движении зерен пшеницы непрерывным потоком с условной шириной потока зерна  $1,0 \pm 0,1$  см.

Затем осуществлялось проращивание зерен в одинаковых условиях: температура воздуха в помещении  $+20-22^\circ\text{C}$ , освещение смешанное, влажность воздуха

70-75%. Для чистоты эксперимента и оценки влияния только ионизирующего излучения при проращивании не добавляли подкормки. Проращивание осуществлялось без земли на льняных подложках, являющихся экологически чистым биоразлагаемым материалом, температура воды (20±2)°С, РН среды 6,0-6,3, уровень воды был на 1,5-2,0 см выше поверхности зерна, с периодическим орошением зерен. Для проращивания зерно брали в течение первых суток после обработки излучением и до 7 суток после хранения такого зерна. Фенологические наблюдения осуществлялись 2 раза в сутки. Расчет энергии прорастания за 3 суток и способность прорастания зерна через 5 суток проводился согласно требований ГОСТ 10968-88. Влажность зерна определяли по ГОСТ 13586.5-2015 с использованием воздушно-тепловой сушилки, количество клейковины – по ГОСТ Р 54478-2011 путем отмывания клейковины ручным способом, массовую долю сырого протеина (белок) – по ГОСТ 10846-91 титриметрическим способом по Къельдалю, аминокислотный состав – по ГОСТ 32195-2013 с применением аминокислотного анализатора и по ГОСТ 31480-2012. Забор образцов микроорганизмов с поверхности зерна пшеницы осуществлялся путем смывов дистиллированной

водой, посев проводился на питательной среде в чашках Петри, подсчет колоний проводился через каждые 24 ч при температуре +28°С. Все исследования проводились по общепринятым методикам в пятикратной повторности.

**Результаты.** Согласно ГОСТ 27186-86 к пророщенному зерну относится зерно, вышедшее за пределы покровов корешками или ростками.

На первом этапе для проращивания были использованы зерна пшеницы в течение 1 дня после обработки излучением. В соответствии с полученными результатами исследований установлено, что зерна пшеницы мягкой яровой сорта Л-503 контрольной группы отличаются достаточно высокой энергией прорастания – 82,1%, когда на 3-е сутки начали проявляться проростки из-под плодовых и семенных оболочек, и по истечении 5 суток на фазе роста начали появляться сами ростки (проростки) длиной до 0,7-0,8 мм за счет незначительного увеличения способности к прорастанию на 1,9%, при дальнейшем проращивании до 6-7-и суток не установлено достоверного увеличения всхожести зерен – разница между результатами исследований находилась в пределах 0,01-0,02%, длина проростков увеличилась до 0,8-0,9 мм (рис. 2).

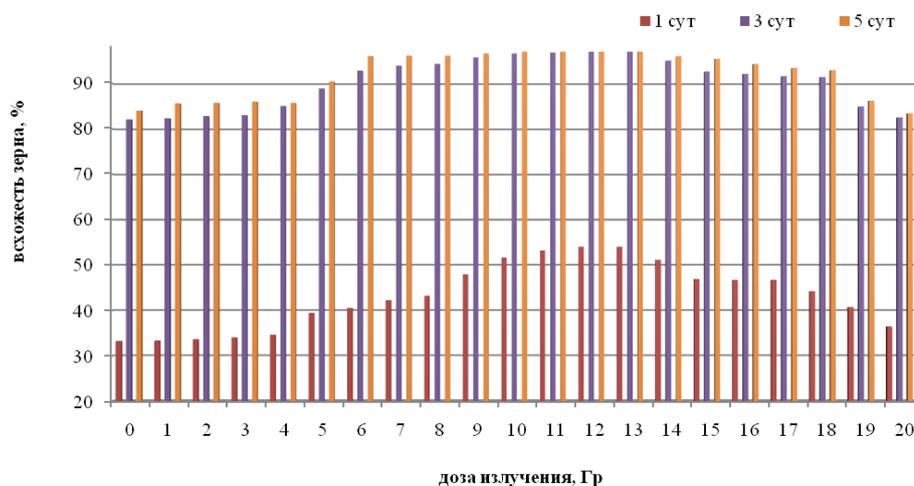


Рисунок 2 – Динамика всхожести зерен зерна пшеницы, необработанных и обработанных разными дозами ионизирующего излучения (от 1 Гр до 20 Гр) в процессе проращивания до 5 суток

После проведения обработки зерен пшеницы разными дозами ионизирующего излучения можно отметить увеличение процента всхожести в опытных группах. При облучении малыми дозами излучения (1-4 Гр) через трое суток происходит проявление проростков из-под оболочек и увеличение всхожести на 0,2-2,9% по сравнению с образцами контрольной группы, через 5 суток темпы замедляются и зафиксировано увеличение всхожести на 0,6-1,7% соответственно, при этом длина проростков равна 0,8-1,0 мм. Облучение дозами 5-8 Гр приводит к увеличению энергии прорастания на 6,8 -12,2% по сравнению с контрольными образцами и достижению показателей до 88,9% в образцах опытной группы № 5

и 94,3% – в образцах опытной группы № 8. Способность прорастания увеличивается незначительно – до 90,4% и 96,1% соответственно, длина проростков равна 0,9-1,1 мм. На 6-е сутки изменение всхожести в опытных группах зерен пшеницы, обработанных дозами 1-8 Гр, незначительно и составляет 0,1-0,7%. Проростки становятся более крепкими. Появляются зародышевые корешки. Обработка опытных образцов зерен пшеницы дозами от 9 Гр до 13 Гр показала высокую энергию прорастания и одновременное проклевывание проростков из-под оболочек в 95,7-97,0% зерен на 3-е сутки, в 96,6-97% зерен на 5-е сутки, что может говорить о стимулирующем эффекте таких доз излучения. В образцах, обработанных дозами 12-

13 Гр, процент всхожести на 3-5-6 сутки одинаков и составляет 97,0%. У пророщенных обработанных излучением зерен пшеницы проростки достигают длину (1,4-1,9) ±0,1 мм на 5-е сутки, зародышевые корешки – до (1,0-1,4)±0,1 мм. С увеличением дозы излучения свыше 14 Гр (до 20 Гр) установлено незначительное уменьшение процента всхожести зерен по сравнению с опытными группами №№ 9-13, наименьший процент всхожести установлен в группах № 19 и № 20 – 84,9% и 82,5% соответственно через 3-е сутки и 86,2% и 83,4% на 5-е сутки соответственно. Длина проростков через пять суток составляет 1,4-1,5 мм. Полученные результаты выше, чем в контрольных образцах, и сопоставимы с образцами, обработанными низкими дозами – до 3 Гр. Можно отметить ингибирующее влияние доз свыше 14 Гр на процесс радиостимуляции роста зерен.

Полиномиальные уравнения второй степени прямого вида показывают зависимость изменения всхожести от дозы облучения с высокими коэффициентами корреляции – от 0,962 до 0,972 и представлены в таблице 1.

Изменение коэффициентов в уравнениях обусловлено обработкой излучением оптимальными дозами, установленными опытным путем.

На втором этапе для проращивания были использованы зерна через 7 дней после обработки ионизирующим излучением. Полученные результаты показывают, что установленные оптимальные дозы излучения соответствовали результатам первого этапа, однако всхожесть зерна ниже на 0,5-0,7% для зерен, обработанных дозами 1-4 Гр, на 0,9-1,2% и на

1,0-1,7% для зерен, обработанных дозами 5-8 Гр и 9-13 Гр соответственно. Всхожесть зерен, обработанных дозами от 14 Гр до 20 Гр, упала на 2,4-3,2%, что может быть связано с ингибирующим влиянием применяемых доз излучения.

Проведение исследований отдельных физико-химических показателей показывает необходимость продолжения исследований в этом направлении. Влажность зерна контрольной группы составила 9,82±0,01%, после обработки происходит незначительное ее снижение до 9,80±0,01%. Хлебопекарные качества зерна пшеницы связаны с его белковым комплексом, с количеством и качеством клейковины. Так, содержание клейковины в контрольных образцах зерна пшеницы составило (20,5±0,1)% с несущественным снижением количества клейковины в обработанных стимулирующими дозами (9-13 Гр) образцах до (20,4±0,2)%. Опытным путем установлено, что в зернах пшеницы контрольной группы содержание сырого протеина – (9,20±0,03)%, в зернах пшеницы после обработки стимулирующими дозами происходит частичный протеолиз белковых фракций с увеличением водорастворимых белковых фракций и небелковых веществ. При этом не установлено достоверных изменений в течение установленного периода прорастания до 5-и суток. Аминокислоты белков пшеницы относятся к физиологически активным веществам и в процессе проращивания под влиянием различных факторов отмечается увеличение свободных аминокислот. В белках пшеницы яровой к лимитирующим аминокислотам относятся лизин и треонин ( $p \leq 0,05$ ) (табл. 2).

Таблица 1 – Результаты корреляционного анализа

Группы образцов	Полиномиальная модель	R <sup>2</sup>
1-я контрольная	$Y = -3,878 \cdot X^2 + 36,60 \cdot X + 1,62$	0,972
9-я опытная (доза облучения 9 Гр)	$Y = -3,796 \cdot X^2 + 35,56 \cdot X + 17,60$	0,967
10-я опытная (доза облучения 10 Гр)	$Y = -3,630 \cdot X^2 + 33,76 \cdot X + 22,61$	0,967
11-я опытная (доза облучения 11 Гр)	$Y = -3,541 \cdot X^2 + 32,75 \cdot X + 25,41$	0,966
12-я и 13-я опытные (доза облучения 12 Гр и 13 Гр)	$Y = -3,525 \cdot X^2 + 32,32 \cdot X + 27,22$	0,962

Таблица 2 – Аминокислотный скор белков пшеницы, необработанной и обработанной излучением дозами 9-13 Гр в процессе проращивания, %

Аминокислота	Продолжительность проращивания, сут				
	Необработанная пшеница		Обработанная пшеница		
	0	5	0	3	5
Валин	100,46±0,02	100,50±0,03	100,48±0,02	102,42±0,02	103,78±0,03
Изолейцин	100,28±0,02	100,31±0,03	100,30±0,02	100,40±0,01	100,94±0,03
Лейцин	101,28±0,03	101,32±0,03	101,30±0,02	102,43±0,01	105,34±0,02
Лизин	48,89±0,01	48,98±0,02	48,90±0,01	49,47±0,02	52,93±0,01
Метионин+цистин	104,61±0,04	104,83±0,04	104,62±0,03	105,45±0,02	106,13±0,03
Треонин	69,45±0,02	69,59±0,01	69,47±0,02	71,35±0,02	72,50±0,01
Триптофан	109,66±0,03	109,95±0,03	109,69±0,03	111,00±0,04	114,30±0,01
Фенилаланин+тирозин	100,75±0,03	100,95±0,03	100,78±0,02	101,39±0,02	102,53±0,03
Итого	89,99±0,03	90,05±0,03	90,00±0,02	91,02±0,02	92,84±0,02

По результатам исследований установлено, что в пшенице мягкой яровой сорта Л-503 аминокислотный скор белка ниже 100% за счет лимитирующих аминокислот лизина и треонина, в процессе проращивания наблюдается увеличение АКС собственно аминокислот. Наряду с этим, под воздействием радиостимуляции малыми дозами,

наблюдается более интенсивное увеличение аминокислотного сора аминокислот в обработанных излучением образцах на 5-е сутки по сравнению с необработанными образцами на аналогичном периоде проращивания. АКС аминокислот в опытных образцах обработанной излучением пшеницы увеличился в процессе проращивания: валин – на

3,28%, изолейцин – 0,64%, лейцин – на 3,99%, лизин – на 8,25%, комплекс метионина с цистином – на 1,44%, треонин – на 4,66%, триптофан – на 4,21%, комплекс фенилаланина с тирозином – на 1,74%, что показывает повышение биологической ценности белка пшеницы, обработанной оптимальными стимулирующими дозами излучения, на фазе роста.

Согласно требований ТР ТС 015/2011 микробиологические показатели в зерне не регламентируются. В тоже время, применяемые малые дозы излучения, не оказывая сублетального воздействия на микроорганизмы и грибную микробиоту, способствует замедлению распространению поверхностной микрофлоры: содержание КМАФАнМ –  $0,100 \cdot 10^4$  КОЕ/г, содержание грибной микробиоты –  $0,320 \cdot 10^4$  КОЕ/г.

**Обсуждение.** Сравнительный анализ постановки эксперимента с организацией эксперимента другими исследователями показывает, что, несмотря на определенную схожесть исследований (исследована пшеница, проведена обработка излучением, определено содержание отдельных нутриентов), авторами проведены исследования на пшенице определенного сорта, при этом выборка в каждой группе составляла 1000 зерен, применен широкий диапазон доз излучения (от 0 до 20 Гр), всхожесть зерен высчитывалась ежедневно (показан высокий коэффициент корреляции – от 0,962 до 0,972), был изменен временной фактор – организация эксперимента сразу после облучения и через 7 дней после облучения. Для исследования биологической ценности был исследован не только аминокислотный состав, но и рассчитан аминокислотный скор с высокой степенью достоверности ( $p \leq 0,05$ ).

Опытным путем установлено, что в одинаковых условиях проращивания и активизации биохимических реакций в зерне на фоне возникших гидролитических процессов при снижении проницаемости клеточных мембран для воды сначала происходит набухание и последующее уширение зерна, на фазе прорастания начинают проклевываться проростки из-под оболочек с различной степенью активности в разном количестве зерен и ориентировочно на 5-е сутки для облученного зерна или 6-7-е сутки для необлученного зерна увеличивается длина зерна и растет проросток до 1,5-1,9 мм. К оптимальным дозам ионизирующего излучения можно отнести дозы в пределах 9-13 Гр. Фазы контролируемого проращивания сопоставимы с исследованиями [42].

Необходимо проведение дальнейших исследований ферментативной активности протеаз в зерне пшеницы после обработки разными дозами ионизирующего излучения, которые влияют на энергию и способность прорастания зерен пшеницы, и для установления времени контролируемого проращивания, которое позволит достичь одновременно и повышение биологической ценности проросшего зерна в результате активизации ферментного комплекса, и в тоже время не

допустить неконтролируемости этого процесса. При этом, как отмечают [43], молекулярные механизмы радиационного гормезиса, несмотря на продолжительный период его исследования, до сих пор до конца не ясны.

Полученные результаты по всхожести зерен контрольной и опытных групп пшеницы позволяют с помощью корреляционного анализа установить наличие связи между переменными X (период проращивания, сут) и Y (всхожесть семян, %).

Данные экспериментальных исследований после проращивания зерен пшеницы через 7 дней после их обработки ионизирующим излучением сопоставимы с выводами ученых в части ограниченного периода активности деления клеток после облучения до 4-6 суток [29, 32, 37].

Исследование аминокислотного сора по аминокислотам в образцах пшеницы до и после облучения показывает, что содержание незаменимых аминокислот в исследуемых образцах больше, чем в «идеальном» белке по основным аминокислотам, кроме лизина и треонина, в которых установлены более высокие темпы увеличения АКС по сравнению с другими незаменимыми аминокислотами. В облученных образцах пшеницы установлены более высокие количественные значения АКС по всем незаменимым аминокислотам по сравнению с необлученными образцами, что может быть обусловлено воздействием излучения и переходом зерна в фазу биологической активности. При увеличении продолжительности проращивания свыше 5-и суток происходит снижение темпов увеличения АКС, что косвенно подтверждается результатами по всхожести семян.

**Выводы.** Применение пророщенных зерен при производстве пищевой продукции функциональной направленности определяет необходимость применение эффективных технологий проращивания зерен, включая этапы подготовки зерна к проращиванию и самой технологии проращивания. Использование радиостимуляции зерна в результате обработки оптимальными дозами излучения от 9 Гр до 13 Гр зерен пшеницы мягкой яровой сорта Л-503, районированной для Нижне- и Средневолжского, Уральского и Центрально-Черноземного регионов, позволяет обеспечить высокую энергию прорастания через 3-е суток в результате снижения проницаемости мембран для воды, полностью соответствующую способности прорастания через 5 суток, и получать пророщенное зерно пшеницы с крепкими проростками длиной до 1,9 мм. Установлены незначительные изменения влажности, количества клейковины и сырого протеина на коротком временном промежутке проращивания зерен пшеницы. Несмотря на снижение всхожести предварительно обработанного ионизирующим излучением зерна после хранения в течение 7-и суток, полученные результаты выше, чем в необработанном излучением зерне, что является важным в условиях поддержания микробиального равновесного поло-

жения и подтверждает стимулирующий эффект малых доз ионизирующего излучения при проращивании зерен пшеницы.

Увеличение аминокислотного сгора белка и по незаменимым аминокислотам в образцах опытных групп пшеницы, позволяющее покрывать суточные потребности в незаменимых аминокислотах, показывает определенное положительное влияние излучения, запускающего как катализатор биопроцессов в зерне. Результаты проведенных исследований предопределяют возможность практического применения технологии проращивания зерна пшеницы, предварительно обработанного оптимальными стимулирующими дозами ионизирующего излучения в четко фиксированные сроки, что позволяет улучшить всхожесть зерна и достичь более высоких количественных показателей биологической ценности белка пшеницы, обработанной излучением, по сравнению с зернами пшеницы, необработанными излучением. Полученные экспериментальные данные подтверждаются повторяемостью результатов и согласуются в определенной мере с другими исследователями. Рекомендуется дальнейшее проведение комплексных экспериментов, в том числе и для других видов и сортов зерновых, бобовых, крупяных и масличных культур, а также для углубленного исследования состава нутриентов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Акулич А.В., Самуйленко Т.Д., Тимакова Р.Т. Разработка компонентного состава сухих композитных смесей для варенных сортов хлеба улучшенной пищевой ценности // *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2021. № 4. С.158-171. DOI: 10.36107/spfp.2021.240.
2. Тимакова Р.Т., Макеева Т.И. Особенности технологии выращивания микрозелени пшеницы и раторопши пятнистой // *e-FORUM*. 2020. № 1 (10), 8. <http://eforum-journal.ru/ru/vypuski-2020?id=236>.
3. Юлчиева С.А., Мамаджанов Л., Атаханов Ш.Н., Мирабдуллаев Н.Х. Пророщенные зерна пшеницы – основа витаминов и питательных веществ // *Universum: технические науки*. 2021. № 3-2 (84). С. 95-99. DOI: 10.32743/ UniTech. 2021. 84.3-2.95-99.
4. Салманов М.М., Мусаева Н.М., Алигазиева Н.М., Магомедова Н.Б. Напитки с применением пророщенного зерна пшеницы // *В сб. Инновационное развитие современной науки. Мат. Междунар. науч.-практ. конф. Под общей редакцией Е.А.Назарова*. 2021. С. 15-21.
5. Гиноян Р.В., Назарова Н. Е., Бондарева Ю.Н. Технология производства йогурта функционального назначения, обогащенного смесью сухого порошка пророщенной пшеницы и пюре из черники и голубики // *Вестник ВГУИТ*. 2018. № 80(4). С.283-287. DOI:10.20914/2310-1202-2018-4-283-287.
6. Finnie S., Brovelli V., Nelson D. Sprouted grains as a food ingredient // *SPROUTED GRAINS: NUTRITIONAL VALUE, PRODUCTION, AND APPLICATIONS*. 2019. P.113-142. DOI: 10.1016/B978-0-12-811525-1.00006-3.
7. Арисов А.В., Чугунова О.В., Тиунов В.М. Использование полуфабриката из цельнозернового пророщенного сырья в производстве сладких блюд // *Пищевая промышленность*. 2022. № 1. С. 12-15.
8. Сумина А.В., Полонский В. И., Шалдаева Т. М. Функциональная ценность талгана, изготовленного из пророщенного зерна пшеницы и ячменя // *Вестник ВГУИТ*. 2021. 83 (1). С. 163–168. DOI:10.20914/2310-1202-2021-1-163-168.
9. Хузин Ф.К., Канарская З. А., Ивлева А.Р., Гематдинова В.М. Совершенствование технологии производства хлебобулочного изделия на основе измельченного пророщенного зерна пшеницы // *Вестник ВГУИТ*. 2017. № 79(1). С. 178-187. DOI:10.20914/2310-1202-2017-1-178-187.
10. Вебер А.Л., Леонова С.А., Жданева Н.П., Никифорова Т.А. Разработка мероприятий по обеспечению качества и безопасности производства хлеба из пшеничной муки с использованием дисперсии из пророщенного зерна гороха и фасоли отечественной селекции // *Хлебопродукты*. 2021. № 1. С. 44-51.
11. Замошникова Р.П., Неверова О.П. Совершенствование технологии производства хлебобулочных изделий из пророщенного зерна пшеницы с добавлением пшеничной закваски // *Молодежь и наука*. 2021. № 1. С.27.
12. Niroula A., Khatri S., Khadka D., Timilsina R. Total phenolic contents and antioxidant activity profile of selected cereal sprouts and grasses // *International journal of food properties*. 2019. Vol.22, № 1. P. 427-438. DOI: 10/1080/10942912.2019.1588297.
13. Зенькова М.Л., Акулич А.В., Мельникова Л.А., Тимофеева В.Н. Исследование нутриентного состава пророщенного зерна пшеницы, выращенного в Беларуси // *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2000. № 3. С. 58-68.
14. Лукин А.А., Меренкова С.П. Разработка технологии производства хлебобулочного изделия с использованием муки из пророщенного зерна пшеницы // *Вестник Юно-Уральского государственного университета*. 2016. № 3. С. 5-12.
15. Крючкова Е.Р., Борисенко Е.Г. Микробная биоконверсия пророщенного зерна пшеницы // *Наукоосфера*. 2021. 7-2. С. 270-276.
16. Икрами М.Б., Шарипова М.Б., Каримов О.С., Мирзорахимов К.К. Амилазный комплекс муки из пророщенной пшеницы // *Вестник Технологического университета Таджикистана*. 2021. № 2 (45). С. 58-63.
17. Jribi S., Molhar H., Antal O.T., Adanyi N., Kheriji O., Naar Z., Debbabi H. Zinc fortification as a tool for improving sprout hygienic and nutritional quality: a factorial design approach/ S. Jribi, // *Journal of the science of food and agriculture*. 2019. Vol. 99, № 11. P. 5187-5194. DOI: 10.1002/jsfa.9765.
18. Pivovarov O., Kovaliova V., Koshulko V. Effect of plasmatically activated aqueous solution on process of food sprouts production // *Ukrainian food journal*. 2020. Vol. 9, № 3. P. 575-587. DOI: 10/24263/2304-974X-2020-9-3-7.
19. Benincasa P., D'Amato R., Falcinelli B., Troni E., Fontanella M.C., Frusciant S., Guiducci M., Beone G.M., Businelli D., Diretto G. Grain endogenous selenium and moderate salt stress work as synergic elicitors in the enrichment of bioactive compounds in maize sprouts // *Agronomy-basel*. 2020. Vol. 10, № 5. С. 735. DOI: 10.3390/ agronomy10050735.
20. Бурова Н.О. Технология сухого пророщенного зерна вакуумной сушки с использованием крапивы // *Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства*. 2021. № 23. С. 166-169.
21. Антипова Л.В., Дарьин А.О. Белковый продукт функционального назначения из пророщенного зерна чечевицы // *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*. 2022. № 1(85). С.16-20.
22. Вендин С.В., Саенко Ю.В., Широков М.С., Страхов В.Ю. Влияние продолжительности освещения на скорость проращивания и химический состав зерна сои и люпина // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2021. Т. 68, № 1(42). С. 93-98.
23. Chiu KY. Changes in microstructure, germination, sprout growth, phytochemical and microbial quality of ultrasonication treated adzuki bean seeds // *Agronomy-basel*. 2021. Vol. 11, № 6:1093. DOI: 10.3390/ agronomy11061093.
24. Пономарёва Е.И., Алёхина Н.Н., Скворцова О.Б. Изменение пищевой ценности зерна гречихи при проращивании с использованием обработанной ультразвуком воды // *Известия ВУЗ. Пищевая технология*. 2020. № 1 (373). С. 30-33.
25. Тимакова Р.Т. Научно-практические аспекты идентификации и обеспечения сохранности пищевой продукции, обработанной ионизирующим излучением: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.18.15. Екатеринбург, 2020. 36 с.
26. Веселова Т.В. Изменение состояния семян при их хранении, проращивании и под действием внешних факторов (ионизирующего излучения в малых дозах и других слабых воздействий), определяемое методом замедленной

люминесценции: автореф. дис. ... докт. биол. наук. М., 2008. 48 с.

27. Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности Под общ. ред. Г.В. Козьмина, С.А. Гераськина и Н.И. Санжаровой Обнинск: ВНИИРАЭ, 2015. – 400 с.

28. Битаршвили С.В., Бондаренко В.С. Анализ транскрипционной активности генов метаболизма гиббереллинов после  $\gamma$ -облучения семян ячменя // В сб.: Радиационные технологии в сельск. хоз. и пищ. пром.: состояние и перспективы: сб. докл. междунар. научно-практ. конф. (26-28 сентября 2018г.). Обнинск: ФГБНУ ВНИИ радиологии и агроэкологии, 2018. С. 46-48.

29. Кузин А.М. Стимулирующее действие ионизирующего излучения на биологические процессы. М.: Атомиздат, 1977. 136 с.

30. Кузин А.М., Каушанский Д.А. Прикладная радиобиология. М.: Энергоиздат, 1981. 221 с.

31. Penfield S., King J. Towards a systems biology approach to understanding seed dormancy and germination // Proc. R. Soc. B. 2009. Vol. 276. P. 3561-3569.

32. Пономаренко П.А., Безотосный С.С., Фролова М.А. Стимуляционный эффект при спецобработке семян сельскохозяйственных культур гамма-лучами // В сб.: Радиационные технологии в сельск. хоз. и пищ. пром.: состояние и перспективы: сб. докл. междунар. научно-практ. конф. (26-28 сентября 2018г.). Обнинск: ФГБНУ ВНИИ радиологии и агроэкологии, 2018. С. 112-113.

33. Лутова Л.А., Ежова Т.А., Додуева И.Е., Осипова М.А. Генетика развития растений. СПб.: Наука, 2010. 539 с.

34. Волкова П.Ю., Чурюкин Р.С., Гераськин С.А. Влияние  $\gamma$ -облучения семян на активность ферментов в проростках ячменя // Радиационная биология. Радиоэкология. 2016. Т. 56, №2. С. 190-196.

35. Чурюкин Р.С. Закономерности формирования биологических эффектов при  $\gamma$ -облучении семян ячменя: дис. ... канд. биол. наук. Обнинск: ВНИИРАЭ, 2017. 137 с.

36. Соснина И.В., Волкова П.Ю. Оценка морфологических параметров проростков ячменя после  $\gamma$ -облучения семян в малых дозах // В сб.: Радиационные технологии в сельск. хоз. и пищ. пром.: состояние и перспективы: сб. докл. междунар. научно-практ. конф. (26-28 сентября 2018г.). Обнинск: ФГБНУ ВНИИ радиологии и агроэкологии, 2018. С. 118-120.

37. Гудков И.Н. Основы общей и сельскохозяйственной радиобиологии. Киев: Изд-во УСХА, 1991. – 328 с.

38. Корнеев Н.А., Поваляев А.П., Алексахин Р.М., Анненков Б.Н., Батыгин Н.Ф., Андреев С.В. Некоторые итоги и задачи использования радиоизотопов и ионизирующих излучений в сельском хозяйстве // Изотопы в СССР. 1980. С. 149-155.

39. Aladjadjian A. The use of physical methods for plant growing stimulation in Bulgaria // Journal of Central European Agriculture. 2007. Vol. 8, № 3. P. 369-380.

40. Melki M., Marouani A. Effects of gamma rays irradiation on seed germination and growth of hard wheat // Environ. Chem. Lett. 2010. Vol. 8. P.307-310.

41. Timakova R., Efremova S., Zuparova V. Ways to improve the technological properties of commercial grain and ensure its preservation // AIP Conference Proceedings: International conference on food science and biotechnology. (FSAB 2021). 2021. Vol. 2419(1):020017. DOI:10.1063/5.0069615.

42. Науменко Н.В., Потороко И.Ю., Науменко Е.Е. Применение шкалы микрофенологических фаз для процесса контролируемого прорастивания пшеницы // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. 2021. Т. 9, № 2. С. 47-56.

43. Бондаренко В.С., Татарова М.Ю. Полиморфизм IRAP-маркеров в зародышах семян ячменя при радиационном воздействии // В сб.: Радиационные технологии в сельск. хоз. и пищ. пром.: состояние и перспективы: сб. докл. междунар. научно-практ. конф. (26-28 сентября 2018г.). Обнинск: ФГБНУ ВНИИ радиологии и агроэкологии, 2018. С. 54-58.

*Статья поступила в редакцию 14.06.2022*

*Статья принята к публикации 16.09.2022*

УДК: 616.155.075:577.18

DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0014

**ИЗУЧЕНИЕ ПРОБИОТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНСОРЦИУМА ШТАММОВ  
АЦИДОФИЛЬНОЙ ПАЛОЧКИ**

© Авторы 2022

SPIN: 5194-7508

AuthorID: 1137837

ORCID: 0000-0003-3988-8521

**ФРОЛОВА Анна Сергеевна**, магистрант кафедры бионанотехнологии*Кемеровский государственный университет**(650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, д. 6, e-mails: flyflyflyfly.af@mail.ru)*

SPIN: 4510-4135

AuthorID: 1137817

ORCID: 0000-0002-3044-3529

**СЕРАЗЕТДИНОВА Юлия Ренатовна**, магистрант кафедры бионанотехнологии*Кемеровский государственный университет**(650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, д. 6, e-mails: serazetdinova2000@mail.ru)*

SPIN: 8227-2844

AuthorID: 542534

ORCID: 0000-0002-3536-562X

ResearcherID AAF-8938-2021

ScopusID 57041280000

**МИЛЕНТЬЕВА Ирина Сергеевна**, доктор технических наук, доцент кафедры бионанотехнологии*Кемеровский государственный университет**(650000, Россия, Кемерово, Красная 6, e-mails: irazumnikova@mail.ru)*

ORCID: 0000-0002-0309-5709

ResearcherID: L-2502-2016

ScopusID: 36028520300

**НЕВЕРОВА Ольга Александровна**, доктор биологических наук, профессор,

заведующий кафедрой экологии и природопользования

*Кемеровский государственный университет**(650000, Россия, Кемерово, Красная 6, e-mails: nev11@yandex.ru)*

**Аннотация.** Пробиотики – живые микроорганизмы, способные приносить пользу для здоровья благодаря своему воздействию на желудочно-кишечный тракт (ЖКТ) при введении в адекватном количестве. В современном мире наиболее острой становится проблема дисбактериоза. Практически любые изменения микробиома кишечника сопутствуют патологическим состояниям. С одной стороны это создает необходимость лечения основного заболевания, а с другой – необходимость восстановления естественной микробиоты человека. Для восстановления естественной микрофлоры могут применяться молочнокислые бактерии (МКБ), за счет способности подавлять рост и развитие патогенных и условно-патогенных микроорганизмов. Пробиотики, выделенные из ЖКТ (к таким относятся и некоторые штаммы *Lactobacillus acidophilus*), более устойчивы к экстремальным условиям среды и способны прикрепляться к клеточной стенке кишечника человека. В работе изучены устойчивость консорциума микроорганизмов рода *Lactobacillus acidophilus* к условно-патогенным микроорганизмам и экстремальным условиям ЖКТ. Установлено, что штаммы ацидофильной палочки устойчивы к следующим условно-патогенным микроорганизмам: *Candida lipolit*, *Aspergillus niger*, *Staphylococcus albus* и *Escherichia coli*. В данной работе консорциум ацидофильных палочек устойчив к 0,4% фенола. Также консорциум способен развиваться в присутствии значительной концентрации желчи (40%) и 2% хлорида натрия.

**Ключевые слова:** пробиотик, ацидофильная палочка, условно-патогенные микроорганизмы, ЖКТ, фенол, желчь, хлорид натрия.

**STUDYING THE PROBIOTIC PROPERTIES OF A CONSORTIUM STANDS  
OF LACTOBACILLUS ACIDOPHILUS**

© The Author(s) 2022

**FROLOVA Anna Sergeevna**, master's student of the Department of Bionanotechnology*Kemerovo State University**(650000, Russia, Kemerovo, Krasnaya 6, e-mails: flyflyflyfly.af@mail.ru)***SERAZETDINOVA Yulia Renatovna**, master's student of the Department of Bionanotechnology*Kemerovo State University**(650000, Russia, Kemerovo, Krasnaya 6, e-mails: serazetdinova2000@mail.ru)***MILENTYEVA Irina Sergeevna**, doctor of technical sciences,

associate professor of the Department of Bionanotechnology  
Kemerovo State University  
(650000, Russia, Kemerovo, Krasnaya 6, e-mails: irazumnikova@mail.ru)  
**NEVEROVA Olga Alexandrovna**, doctor of biological sciences, professor,  
head Department of Ecology and Nature Management  
Kemerovo State University  
(650000, Russia, Kemerovo, Krasnaya 6, e-mails: nev11@yandex.ru)

**Abstract.** Probiotics are live microorganisms that can confer health benefits through their effects on the gastrointestinal tract when administered in adequate amounts. In the modern world, the most acute problem is dysbacteriosis. Virtually any changes in the gut microbiome are associated with pathological conditions. On the one hand, this creates the need to treat the underlying disease, and on the other, the need to restore the natural human microbiota. To restore the natural microflora, lactic acid bacteria (LAB) can be used, due to the ability to suppress the growth and development of pathogenic and opportunistic microorganisms. Probiotics isolated from the gastrointestinal tract (including some strains of *Lactobacillus acidophilus*) are more resistant to extreme environmental conditions and are able to attach to the cell wall of the human intestine. The paper studied the resistance of a consortium of microorganisms of the genus *Lactobacillus acidophilus* to opportunistic pathogens and extreme conditions of the gastrointestinal tract. It has been established that acidophilus bacillus strains are resistant to the following conditionally pathogenic microorganisms: *Candida lipolit*, *Aspergillus niger*, *Staphylococcus albus* and *Escherichia coli*. In this work, a consortium of acidophilus rods is resistant to 0,4% phenol. Also, the consortium is able to develop in the presence of a significant concentration of bile (40%) and 2% NaCl.

**Keywords:** probiotic, *Lactobacillus acidophilus*, opportunistic pathogens microorganisms, gastrointestinal tract, phenol, bile, NaCl.

**Для цитирования:** Фролова А.С. Изучение пробиотических свойств консорциума штаммов ацидофильной палочки / А.С. Фролова, Ю.Р. Серазетдинова, И.С. Миленьева, О.А. Неверова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022. – Т. 11. – № 3(59). – С. 97-102. – DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0014.

**Введение.** Пробиотики – живые микроорганизмы, способные принести пользу для здоровья благодаря своему воздействию на желудочно-кишечный тракт (ЖКТ) при введении в адекватном количестве ( $10^7$  КОЕ/мл или  $10^7$  КОЕ/г) [1, 2]. Многие пробиотики, применяемые в пищевой промышленности, являются молочнокислыми бактериями (МКБ), которые представляют собой группу бактерий из родов: *Lactobacillus*, *Pediococcus*, *Lactococcus*, *Enterococcus*, *Streptococcus* и *Leuconostoc* [3]. Эффективность применения данных микроорганизмов обусловлена укреплением иммунной системы [4] и модуляцией микробиоты кишечника [5].

В современном мире наиболее острой становится проблема дисбактериоза [6]. Ее решение становится актуальным не только для всех отраслей мировой медицины, но и для пищевой промышленности. Неправильный образ жизни, плохое питание, прием антибиотических препаратов, присутствие условно-патогенных и патогенных микроорганизмов в продуктах питания приводит к пищевым заболеваниям, таким как дисбактериоз, дизентерия, ботулизм [7]. В связи с этим растет количество работ, посвященных изучению микробиома кишечника, как у здоровых, так и у больных людей [8]. Доказано, что практически любые изменения микробиома кишечника сопутствуют патологическим состояниям. С одной стороны это создает необходимость лечения основного заболевания, а с другой – необходимость восстановления естественной микробиоты человека [9].

Для восстановления естественной микрофлоры могут применяться МКБ, характерной чертой кото-

рых является выработка антимикробных веществ и их конкуренция с патогенными микроорганизмами за основные питательные вещества, делая их менее доступными для патогенов, что препятствует их распространению в ЖКТ [10, 11]. Противомикробными веществами выступают бактериоцины, органические кислоты (такие как молочная кислота), углекислый газ, диацетил [12, 13].

Микроорганизмы родов *Lactobacillus* и *Bifidobacterium* используются в 90% пробиотических продуктах и являются популярными среди покупателей, заботящихся о своем здоровье [1]. Для их получения применяют самые разнообразные субстраты, например, в качестве сырья используют овощи, мясо и, главным образом, молочные продукты [14]. За прошедшие десять лет научное понимание о лактобациллах (их функции и метаболизм) существенно расширилось. Это позволило увеличить возможности применения заквасок и заквасочных культур (в том числе пробиотиков) в молочной промышленности [15].

На данный момент особый интерес вызывает *Lactobacillus acidophilus*, так как является представителем нормальной микрофлоры ЖКТ и оказывает оздоровительное воздействие на человека. [16]. Пробиотики, выделенные из ЖКТ (к таким относятся и некоторые штаммы *L. acidophilus*), более устойчивы к экстремальным условиям среды и способны прикрепляться к клеточной стенке кишечника человека. При этом изоляты из ЖКТ чаще подвержены проявлению устойчивости к противомикробным препаратам, что делает их перспективным агентом в восстановлении микрофлоры пациентов с дисбактериозом [17, 18, 19].

Основной характеристикой ацидофильной палочки является ее устойчивость к гнилостной, условно-патогенной и патогенной микрофлоре. В процессе ее жизнедеятельности вырабатываются ацидофилин и лактацин, которые относятся к бактериоцинам. Именно благодаря данным веществам ацидофильную палочку причисляют к ценным пробиотикам [20].

Целью данного исследования является изучение устойчивости консорциума микроорганизмов рода *Lactobacillus acidophilus* к условно-патогенным микроорганизмам и экстремальным условиям ЖКТ.

**Методология.** В данной работе исследовали следующие штаммы микроорганизмов:

1) бактериальная закваска ацидофильная палочка невязкая (Па) БЗ-АНВ («Барнаульская биофабрика», ТУ 9229-369-00419785-04);

2) бактериальная закваска ацидофильная палочка вязкая (Па) БЗ-АВ («Барнаульская биофабрика», ТУ 9229-369-00419785-04).

Для проведения исследований необходимо провести активацию штаммов микроорганизмов. В 5 мл стерильного обезжиренного молока вносили сухой штамм *Lactobacillus acidophilus*. Смесь перемешивали, а затем вносили ее в 100 мл стерилизованного молока для лучшего распределения заквасочной культуры. Сбраживание вели в термостате ТСО-1/80 СПУ (Россия, «Смоленское СКТБ СПУ») при оптимальной температуре для ацидофильной палочки 38°C до образования сгустка. На основе активированных культур готовили консорциум микроорганизмов при смешивании невязкой и вязкой ацидофильной палочки в стерильном молоке в соотношении 1:1.

Антимикробную активность определяли методом диффузии в лунки агар. Штаммы ацидофильной палочки выращивали в бульоне *MRS* (Oxide, Великобритания) и инкубировали в термостате при 38°C в течение 24 часов. Бактериальную культуру центрифуги-

ровали при 2500 об/мин в течение 10 мин для получения бесклеточной надосадочной жидкости. Культуру патогенов распределяли по поверхности среды МПА, стерильным наконечником пипетки объемом 1000 мкл прокалывали среду. На дно лунок наливали по 25-30 мкл бесклеточного супернатанта. Инкубировали при 38°C в течение 24 часов [21].

Изучение устойчивости к фенолу: к 10 мл стерильного обезжиренного молока добавили 0,5 мл 8%-го раствора фенола. Пробирки с молоком тщательно перемешали и засеяли исследуемым штаммом *Lactobacillus acidophilus* в количестве одной капли. Термостатировали в течение 48 часов при оптимальной температуре культивирования 38°C.

Определение устойчивости к желчи вели по следующей методике: в гидролизованное молоко внесли желчь с рН 6,8-7,0 в количестве 20% и 40%, при этом в питательную среду добавляли культуру ацидофильной палочки в количестве 1 петли на 10 мл среды. Культивирование вели при 38°C в течение 48 часов.

Определение устойчивости к поваренной соли: исследуемую культуру засеяли в количестве 1 петли на 10 мл гидролизованного молока с рН 6,8-7,0 с содержанием хлорида натрия 2% и 4%. Посевы выдерживали в термостате при температуре 38°C в течение 48 часов.

Устойчивость к щелочной реакции среды: в МПБ с 2% дрожжевого автолизата с рН 8,3 засеяли исследуемую культуру в количестве 1 петли на 10 мл. Посевы выдерживали в термостате при 38°C в течение 48 часов.

**Результаты.** В данной работе была исследована резистентность штаммов *Lactobacillus acidophilus* и их консорциума к следующим условно-патогенным микроорганизмам: *Candida lipolit*, *Aspergillus niger*, *Staphylococcus albus* и *Escherichia coli*. Результаты исследования представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Устойчивость *Lactobacillus acidophilus* и их консорциума к условно-патогенным микроорганизмам

Наименование условно-патогенного микроорганизма	Диаметр зоны ингибирования, мм		
	Невязкая ацидофильная палочка	Вязкая ацидофильная палочка	Консорциум
<i>Candida lipolit</i>	13,0±0,7	12,9±0,7	15,8±0,9
<i>Aspergillus niger</i>	6,0±0,3	6,2±0,3	11,1±0,6
<i>Staphylococcus albus</i>	10,8±0,6	10,5±0,6	11,7±0,7
<i>Escherichia coli</i>	22,7±1,3	19,6±1,1	26,7±1,6

По представленным данным видно, что штаммы *Lactobacillus acidophilus* имеют высокую устойчивость к условно-патогенным микроорганизмам. Невязкая ацидофильная палочка в большей степени устойчива к *Escherichia coli* (диаметр зоны ингибирования 22,7±1,3) и *Candida lipolit* (диаметр зоны ингибирования 13,0±0,7). Вязкая ацидофильная палочка также проявила устойчивость в отношении *Escherichia coli* (диаметр зоны ингибирования 19,6±1,1) и *Candida lipolit* (диаметр зоны ингибирования 12,9±0,7). При создании консорциума можно отметить увеличение устойчивости к условно-патогенным микроорганизмам по отношению к невязкой и вязкой ацидофильных палочек. Наибольшую устойчивость

консорциум проявил к *Escherichia coli* (диаметр зоны ингибирования 26,7±1,6) и *Candida lipolit* (диаметр зоны ингибирования 15,8±0,9). Устойчивость консорциума к *Aspergillus niger* увеличилась в 1,82 раза по сравнению со средним значением устойчивости невязкой и вязкой ацидофильной палочки к *Aspergillus niger*, диаметр зоны ингибирования 6,0±0,3 и 6,2±0,3, соответственно.

При определении устойчивости штаммов *L. acidophilus* и их консорциума к 0,4% фенолу получили следующие результаты:

– образование сгустка в молоке при исследовании вязкой ацидофильной палочки произошло через 24 часа, что указывает на высокую устойчивость

штамма к фенолу;

– свертывание молока при исследовании невязкой ацидофильной палочки произошло менее чем за 48 часов, штамм также является устойчивым к фенолу;

– образование сгустка в молоке при исследовании консорциума произошло через 24 часа, что указывает на его высокую устойчивость к фенолу.

При определении устойчивости штаммов ацидо-

фильной палочки и консорциума к желчи выявили, что после встряхивания пробирок, содержащих желчь с концентрацией 20% и 40%, проявляется мутность во всех образцах. Посевы контролировали по микроскопическому препарату. Так как все образцы показали мутность после проведенного опыта, контроль по микроскопическому препарату вели с наибольшей концентрацией желчи в среде, то есть 40%. Микроскопирование образцов показано на рисунке 1.

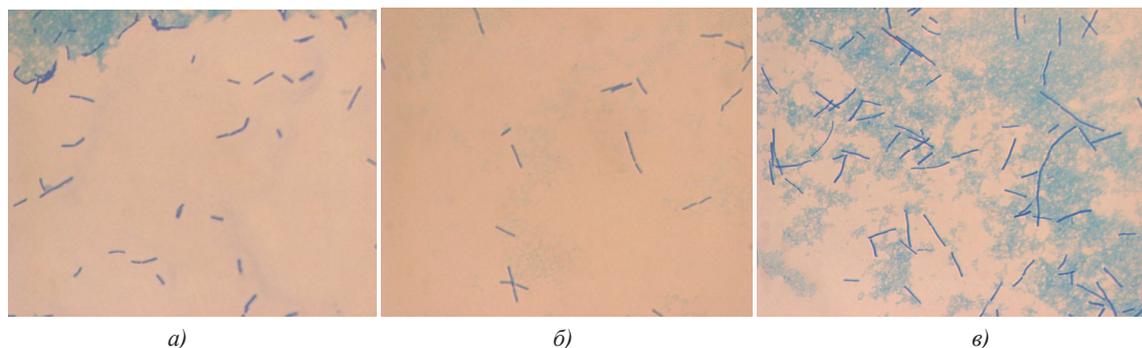


Рисунок 1 – Микроскопирование образцов (окрашивание метиленовым синим) со среды с 40% желчью: а) невязкая ацидофильная палочка; б) вязкая ацидофильная палочка; в) консорциум

По данным микроскопирования видно, что в пробирках с 40% желчью во всех образцах обнаружены представители ацидофильной палочки. Для более точных результатов был проведен посев на чашки Петри для определения концентрации микроорганизмов в образцах. Результаты посева представлены в таблице 2 с учетом разбавления.

Таблица 2 – Концентрация микроорганизмов в среде с 40% желчью

Ацидофильная палочка	Концентрация, КОЕ/г
Невязкая	$1,20 \times 10^4$
Вязкая	$0,44 \times 10^4$
Консорциум	$1,32 \times 10^4$

Как видно из таблицы 2 микроорганизмы в данной среде присутствуют. Их количество меньше, чем в исследуемых образцах ацидофильной палочки, для которой питательной средой являлось стерильное обезжиренное молоко (концентрация микроорганизмов в кисломолочных продуктах не менее  $10^7$ - $10^8$  КОЕ/г). Но данного количества достаточно, для заключения, что при данной концентрации желчи в среде, подавля-

ние невязкой и вязкой ацидофильной палочки незначительно, что говорит об их устойчивости к желчи. При использовании консорциума концентрация микроорганизмов немного выше, чем в образцах с невязкой и вязкой ацидофильной палочкой. Это говорит об увеличении устойчивости к желчи при использовании консорциума.

При определении устойчивости невязкой и вязкой ацидофильных палочек и консорциума к поваренной соли получили следующие результаты: после встряхивания пробирок всех образцов можно отметить, что образцы с содержанием соли 2% проявили мутность среды, а в образцах с содержанием соли 4% мутности не обнаружено. Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что 4% процентное содержания хлорида натрия в среде подавляет рост ацидофильной палочки. Посевы также выборочно контролировали по микроскопическому препарату. Для контроля были выбраны образцы, содержащие 2% соли в среде, так как при данном проценте в среде была проявлена мутность. Результаты микроскопирования показаны на рисунке 2.

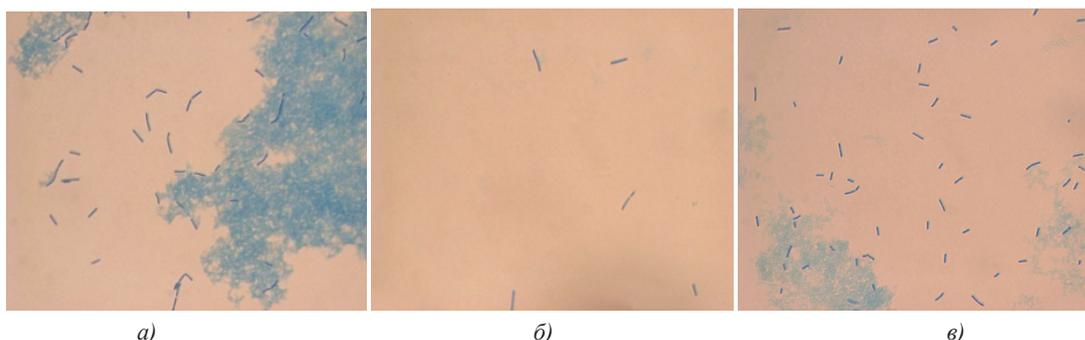


Рисунок 2 – Микроскопирование образцов (окрашивание метиленовым синим), выросших на среде с содержанием хлорида натрия 2%: а) невязкая ацидофильная палочка; б) вязкая ацидофильная палочка; в) консорциум

По данным микроскопирования видно, что в среде с 2% хлорида натрия во всех образцах присутствует ацидофильная палочка. Для более точных результатов был проведен посев на чашки Петри для определения концентрации микроорганизмов в образцах. Результат посева представлен в таблице 3 с учетом разбавления.

Таблица 3 – Концентрация микроорганизмов в среде с 2% соли

Ацидофильная палочка	Концентрация, КОЕ/г
Невязкая	$0,61 \times 10^3$
Вязкая	$0,39 \times 10^3$
Консорциум	$0,74 \times 10^3$

Как видно из таблицы 3 микроорганизмы в данной среде присутствуют. Их количество меньше, чем в исследуемых образцах, для которых питательной средой являлось стерильное обезжиренное молоко (концентрация микроорганизмов в кисломолочных продуктах не менее  $10^7$ - $10^8$  КОЕ/г). Но данного количества достаточно, для заключения, что при данной концентрации соли в среде, подавление роста микроорганизмов незначительно, что говорит об их устойчивости к содержанию в среде 2% соли. Также стоит отметить, что при использовании консорциума концентрация микроорганизмов немного выше, чем в образцах с невязкой и вязкой ацидофильными палочками. Это говорит об увеличении устойчивости к 2% хлорида натрия при использовании консорциума.

По данным проведенного опыта устойчивости ацидофильной палочки к щелочной реакции среды можно сказать следующее: после встряхивания пробирок со средой, мутность была незначительной. При микроскопировании не было обнаружено микроорганизмов. Для проверки данного утверждения был проведен дополнительный опыт в виде посева на чашки Петри глубинным методом. Образцы выдерживали в термостате при температуре 38°C в течение 48 часов. Роста на чашках не обнаружено. Из приведенных данных можно сделать вывод о неустойчивости ацидофильной палочки к щелочной среде с  $pH$  8,3.

**Обсуждение.** Исследования показали, что консорциум невязкой и вязкой ацидофильной палочки устойчив к условно-патогенным микроорганизмам, а именно: *Candida lipolit*, *Aspergillus niger*, *Staphylococcus albus* и *Escherichia coli*. Полученные данные согласуются с данными других ученых. Так, например, T. Khalil и др. [21] установили, что некоторые молочнокислые бактерии выделяют бактериоцины, способные подавлять рост и развитие патогенных и условно-патогенных микроорганизмов.

В ходе исследования также определили, что штаммы *B3-АНВ* и *B3-АВ L. acidophilus* устойчивы к агрессивной среде ЖКТ, что делает их перспективными агентами для разработки функционального питания. Исследования биотехнологических свойств штаммов (способность к кислотообразованию, влагоудерживающие свойства), приведенные нами в других работах, также подтвердили рациональность применения ацидофильной палочки в функциональных продуктах

[22].

**Выводы.** По результатам проведенных исследований увеличилась устойчивость консорциума к условно-патогенным микроорганизмам по отношению к невязкой и вязкой ацидофильных палочек. Наибольшую устойчивость консорциум проявил к *Escherichia coli* (диаметр зоны ингибирования  $26,7 \pm 1,6$ ) и *Candida lipolit* (диаметр зоны ингибирования  $15,8 \pm 0,9$ ). Устойчивость консорциума к *Aspergillus niger* увеличилась в 1,82 раза по сравнению со средним значением устойчивости невязкой и вязкой ацидофильной палочки к данному патогену. Согласно литературным данным большинство штаммов ацидофильной палочки проявляет устойчивость к фенолу (0,3–0,4%), желчи (20%) и щелочной реакции среды ( $pH$  8,3). При щелочной реакции с  $pH$  8,3 роста и развития ацидофильных палочек не обнаружено. В данной работе консорциум ацидофильных палочек устойчив к 0,4% фенола. Также консорциум способен развиваться в присутствии значительной концентрации желчи (40%) и 2% хлорида натрия. Следовательно, данный консорциум из штаммов *L. acidophilus* устойчив к экстремальным условиям ЖКТ (фенол, желчь, *NaCl*).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Fazilah N.F., Ariff A.B., Khayat M.E., Rios-Solis L., Halim M. Influence of probiotics, prebiotics, synbiotics and bioactive phytochemicals on the formulation of functional yogurt // Journal of Functional Foods. – 2018. – Vol. 48. – P. 387–399. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2018.07.039>.
2. Da Costa G.M., de Paula M.M., Costa G.N., Esmerino E.A., Silva R., de Freitas M.Q., Barão C.E., Cruz A.G., Pimentel T.C. Preferred attribute elicitation methodology compared to conventional descriptive analysis: A study using probiotic yogurt sweetened with xylitol and added with prebiotic components // Journal of Sensory Studies. – 2020. – Vol. 35(1). – P. e12602. <https://doi.org/10.1111/joss.12602>.
3. Mathur H, Beresford TP, Cotter PD. Health benefits of lactic acid bacteria (LAB) fermentates // Nutrients. – 2020. – Vol. 12. – P. 1–16. <https://doi.org/10.3390/nu12061679>.
4. Pourbaba H., Anvar A.A., Pourahmad R., Hamed A. Changes in acidity parameters and probiotic survival of the kefir using *Lactobacillus acidophilus* and *Lactobacillus paracasei* complementary probiotics during cold preservation // Iranian Journal of Veterinary Medicine. – 2022. – Vol. 16(1). – P. 89–98. <https://doi.org/10.22059/IJVM.2020.313626.1005141>.
5. Bengoa A.A. Iraporda C., Acurcio L.B., de Cicco S.S H., Costa K., Guimaraes G.M., Arantes R.M.E., Neumann E., Nunes A.C., Nicoli J.R. Physicochemical, immunomodulatory and safety aspects of milks fermented with *Lactobacillus paracasei* isolated from kefir // Food Research International. – 2019. – Vol. 123. – P. 48–55. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.04.041>.
6. Булатов В.П., Камалова А.А., Удачина Э.И., Зинкевич О.Д., Сафина Н.А., Шакирова А.Р. Совершенные методы диагностики дисбактериоза кишечника // Практическая медицина. – 2010. – № 6(45). – С. 50–54.
7. Cristofori F., Dargenio V.N., Dargenio C., Miniello V.L., Barone M., Francavilla R. Anti-inflammatory and immunomodulatory effects of probiotics in gut inflammation: a door to the body // Front. Immunol. – 2021. – Vol. 12. – P. 578386. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2021.578386>.
8. Ардатская М.Д., Бельмер С.В., Добрица В.П., Захаренко С.М., Лазебник Л.Б., Мишушкин О.Н., Орешко Л.С., Ситкин С.И., Ткаченко Е.И., Суворов А.Н., Хавкин А.И. Шендеров Б.А. Дисбиоз (дисбактериоз) кишечника:

современное состояние проблемы, комплексная диагностика и лечебная коррекция // Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология. – 2015. – № 5(117). – С. 13–50.

9. Харченко О.Ф. Проблема дисбактериоза у детей в современных условиях // Медицинские новости. – 2013. – № 6. – С. 50–56.

10. Hadinia N., Dovom M.R.E., Yavarmanesh M. The effect of fermentation conditions (temperature, salt concentration, and pH) with lactobacillus strains for producing Short Chain Fatty Acids // LWT. – 2022. – Vol. 165. – P. 113709. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113709>.

11. Vieco-Saiz N., Belguesmia Y., Raspoet R., Auclair E., Gancel F., Kempf I., Drider D. Benefits and inputs from lactic acid bacteria and their bacteriocins as alternatives to antibiotic growth promoters during food-animal production // Front Microbiol. – 2019. – Vol. 10. – P. 57. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00057>.

12. Kaewchomphonuch T., Charoenpichitnunt T., Thongbaiyai V., Ngamwongsatit N., Kaekok K. Cell-free culture supernatants of Lactobacillus spp. and Pediococcus spp. inhibit growth of pathogenic Escherichia coli isolated from pigs in Thailand // BMC Vet Res. – 2022. – Vol. 18. – P. 60. <https://doi.org/10.1186/s12917-022-03140-8>.

13. Vieco-Saiz N., Belguesmia Y., Raspoet R., Auclair E., Gancel F., Kempf I., Drider D. Benefits and inputs from lactic acid bacteria and their bacteriocins as alternatives to antibiotic growth promoters during food-animal production // Front Microbiol. – 2019. – Vol. 10. – P. 57. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00057>.

14. Feld L., Schjorring S., Hammer K., Licht T.R., Danielson M., Krogfelt K., Wilcks A. Selective pressure affects transfer and establishment of a Lactobacillus plantarum resistance plasmid in the gastrointestinal environment // Journal of Antimicrobial Chemotherapy. – 2008. – Vol. 61(4). – P. 845–852. <https://doi.org/10.1093/jac/dkn033>.

15. Bernardeau M., Vernoux J.P., Henri-Dubernet S., Gueguen M. Safety assessment of dairy microorganisms: The Lactobacillus genus // International Journal of Food Microbiology. – 2008. – Vol. 126(3). – P. 278–285. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2007.08.015>.

16. Lu Q., Guo Y., Yang G., Cui L., Wu Z., Zeng X., Pan D., Cai Z. Structure and anti-inflammation potential of lipoteichoic acids isolated from Lactobacillus strains // Foods. – 2022. – Vol. 11(11). – P. 1610. <https://doi.org/10.3390/foods11111610>.

17. Zeise K.D., Woods R.J., Huffnagle G.B. Interplay between Candida albicans and lactic acid bacteria in the gastrointestinal tract: Impact on colonization resistance, microbial carriage, opportunistic infection, and host immunity // Clin. Microbiol. Rev. – 2021. – Vol. 34. – P. e0032320. <https://doi.org/10.1128/cmr.00323-20>.

18. Mohamadzadeh M., Pfeiler E.A., Brown J.B., Zadeh M., Gramarossa M., Managlia E., Bere P., Sarraj B., Khan M.W., Pakanati K.C., Ansari M.J., O'Flaherty S., Barrett T., Klaenhammer T.R. Regulation of induced colonic inflammation by Lactobacillus acidophilus deficient in lipoteichoic acid // Proc. Natl. Acad. Sci. – 2011. – Vol. 108. – P. 4623–4630. <https://doi.org/10.1073/pnas.1005066107>.

19. Danielsen M., Wind A. Susceptibility of Lactobacillus spp. to antimicrobial agents // International Journal of Food Microbiology. – 2003. – Vol. 82(1). – P. 1–11. [https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(02\)00254-4](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(02)00254-4).

20. Красникова Л.В. Микробиология молока и молочных продуктов. Лабораторный практикум / Л.В. Красникова, П.И. Гунькова, В.В. Маркелова. – СПб.: НИУ ИТМО; ИХИБТ, 2013. – 85 с.

21. Khalil T., Okla M.K., Al-Qahtani W.H., Zahra M., Shakeela Q., Ahmed S., Akhtar N., AbdElgawad H., Asif R., Hameed Y., Adetunji C.O., Farid A., Ghazanfar S. Tracing probiotic producing bacterial species from gut of buffalo (Bubalus bubalis), South-East-Asia // Braz. J. Biol. – 2024. – Vol. 84. – P. e259094. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.259094>.

22. Фролова А.С., Козлова О.В. Исследование симбио-

тического молочного продукта на основе штаммов Lactobacillus acidophilus // Актуальные направления научных исследований: технологии, качество и безопасность. – 2021. – С. 275–278.

**Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Инструментальные методы анализа в области прикладной биотехнологии» на базе ФГБОУ ВО «КемГУ».**

*Статья поступила в редакцию 16.08.2022*

*Статья принята к публикации 16.09.2022*

УДК 663.8

DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0015

**ОЦЕНКА СВОЙСТВ НАПИТКОВ В МОДЕЛЬНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ**

©2022

SPIN: 1518-9343

AuthorID: 559899

ORCID: 0000-0002-5154-7095

ResearcherID: P-8789-2017

ScopusID: 56724069900

**НИЛОВА Людмила Павловна**, кандидат технических наук, доцент Высшей школы сервиса и торговли*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого**(194064, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, e-mail: nilova\_l\_p@mail.ru)*

SPIN: 9685-4847

AuthorID: 288484

ORCID: 0000-0001-6039-429X

ResearcherID: H-8802-2018

ScopusID: 57205391665

**ВИНОГРАДОВА Анна Вячеславовна**, 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: ann-vin@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: malutesha66@mail.ru)*

**Аннотация.** Для оценки влияния окрашенных напитков на состояние зубной эмали рассмотрена модель *in vitro* с тест объектом скорлупой куриных яиц. В исследовании использовали энергетические напитки, настой черного байхового чая, яблочный сок и чайный напиток. Оценивали влияние напитков на цвет скорлупы по колориметрическим характеристикам в системе *CIE Lab*: яркость  $L^*$ , цветность  $a^*$ ,  $b^*$ , общее цветовое различие  $\Delta E^*$  на спектрофотометре *CM-5 KONICA MINOLTA*; состояние поверхности скорлупы на микроскопном лабораторном комплексе ЛабоМед-2; толщину яичной скорлупы на толщиномере покрытий *SaluTron ComBi D3*. Энергетические напитки «Flash Up», «Burn», «Adrenaline Rush» практически не оказывают влияния на колориметрические характеристики скорлупы куриных яиц, но изменяют фактуру поверхности за счет ее сглаживания. Для яблочного сока характерна такая же тенденция с более интенсивным влиянием на колориметрические характеристики и меньшим на состояние поверхности скорлупы. Свежезаваренный чай способствует изменению цвета скорлупы, но не изменяют ее поверхность и толщину. Комбинация настоя черного байхового чая и яблочного сока (30/70) в чайном напитке приводит к меньшему влиянию на цвет скорлупы по сравнению со свежезаваренным чаем, а также уменьшает агрессивное воздействие, приводящее к изменению ее поверхности по сравнению с яблочным соком.

**Ключевые слова:** энергетические напитки, чай черный байховый, яблочный сок, чайный напиток, скорлупа куриных яиц, цвет, толщина, состояние поверхности.

**EVALUATION OF PROPERTIES OF BEVERAGES IN A MODEL EXPERIMENT**

©2022

**NILOVA Liudmila Pavlovna**, phd of engineering, associate professor at the higher school of Service and Trade**VINOGRADOVA Anna Vyacheslavovna**, phd of engineering,

associate professor at the higher school of Service and Trade

**MALUTENKOVA Svetlana Michailovna**, phd of engineering,

associate Professor at the higher school of service and trade

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University**(194021, Russia, Saint-Petersburg, Polytechnic Street, 29, e-mail:**e-mails: nilova\_l\_p@mail.ru, ann-vin@yandex.ru, malutesha66@mail.ru)*

**Abstract.** To assess the effect of colored drinks on the state of tooth enamel, an *in vitro* model with a chicken egg shell test object was considered. The study used energy drinks, black tea infusion, apple juice, and a tea drink. The influ-

ence of drinks on the color of the egg shell was controlled by individual coordinate parameters in the *CIE Lab* system: lightness  $L^*$ , color  $a^*$ ,  $b^*$ ; total color difference  $\Delta E^*$  on a spectrophotometer *SM-5 KONICA MINOLTA*; the state of the shell surface on the microscope laboratory complex *LaboMed-2*; eggshell thickness on the *SaluTron ComBi D3* coating thickness gauge. Energy drinks "*Flash Up*", "*Burn*", "*Adrenaline Rush*" have almost no effect on the colorimetric characteristics of the shell of chicken eggs, but reduced its thickness by smoothing the surface. For apple juice, the same trend is characteristic, with a more intense effect on colorimetric characteristics and a smaller effect on shell thickness. Freshly brewed tea contributes to a change in the color of the shell, but does not affect the condition of its surface and thickness. The combination of black tea and apple juice (30/70) in a tea drink results in less effect on egg shell color compared to freshly brewed tea, and also reduces the aggressive impact that leads to the destruction of its surface compared to apple juice.

**Keywords:** energy beverages, black tea, apple juice, tea drink, chicken egg shell, color, thickness, surface condition.

**Для цитирования:** Нилова Л.П. Оценка свойств напитков в модельном эксперименте / Л.П. Нилова, А.В. Виноградова, С.М. Малютенкова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022. – Т. 11. – № 3(59). – С. 103-108. – DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0015.

**Введение.** В жизни человека вода, соки и безалкогольные напитки играют важную роль. И если употребление питьевой воды связано с удовлетворением физиологических потребностей, то предпочтительное употребление тех или иных напитков дополняется их вкусовыми качествами, формируя психофизиологические свойства. Ассортимент напитков постоянно расширяется, как на основе природного сырья, так и с использованием пищевых добавок – красителей, ароматизаторов, органических кислот и др. [1].

Напитки могут не только утолять жажду, доставлять удовольствие, быть источником антиоксидантов и других питательных веществ [2-4], но их частое употребление может нанести негативное влияние на состояние зубной эмали человека. Так, кофе, чай, красное вино, окрашенные безалкогольные напитки приводят к внешнему изменению цвета зубов [5-9]. Безалкогольные газированные напитки типа колы и спрайта, спортивные и энергетические напитки, фруктовые соки с низким значением pH приводят к значительному изменению структуры поверхности эмали за счет ее деминерализации, вызывая эрозийные поражения и трещины, истончая эмаль вплоть до полного ее разрушения [9-13]. Регулярное употребление энергетических напитков снижает твердость эмали более, чем в 2 раза, кока-колы – в 1,6 раза [13, 14]. Причем энергетические напитки без сахара могут быть более агрессивными. Энергетический напиток «*Red Bull Light*» снижает твердость эмали человеческих зубов в 3,05 раза, а «*Red Bull*» – в 2,76 раза [13]. Традиционные газированные лимонады меньше воздействуют на эмаль, чем кока-кола, различия в снижении микротвердости эмали могут достигать почти в 10 раз [15]. Из фруктовых соков наиболее агрессивное влияние на зубную эмаль оказывают виноградный и апельсиновый соки. По данным [16] эрозийный потенциал виноградного сока больше, чем кока-колы и яблочного сока, что связывают с деминерализацией зубной эмали. Деминерализующий эффект апельсинового сока сопоставим с пепси-колой, и больше чем яблочного сока и диетической кока-колы [17, 18].

Сочетание в напитках низких значений pH и природных или синтетических красителей одновременно приводят к изменению цвета эмали и эрозийным процессам на ее поверхности [11, 12, 19]. Проникновение красителя в поврежденную эмаль происходит намного легче. Так, проникновение красителя, содержащегося в кока-коле, может достигать до 0,81 мм, а в пиве в 4 раза меньше [20]. Однако, полифенолы и кофеин, содержащиеся в таких напитках, как кофе, какао, черный и зеленый чай, и обладающих антимикробными свойствами, препятствует адсорбции продуцентов *Streptococcus mutans* и *Streptococcus sanguinis* поверхностью эмали, покрытой слюной, что обеспечивает профилактический эффект [21, 22].

Способность напитков окрашивать зубную эмаль и их влияние на развитие эрозии часто используется в модельных системах *in vitro* для оценки эффективности отбеливающих зубных паст, возможности использования композитных материалов как пломбировочных средств. В качестве тест объектов используют интактные зубы или пластинки из человеческих зубов [13, 14, 17, 18], а также бычьи [5, 16, 19] или крысиные зубы [10]. Подобрать идентичные зубы для исследований довольно сложно. Состав эмали зубов, цвет, состояние зависит от возраста объекта, типа питания, функциональной группы зубов [15, 23]. В результате в научной литературе публикуются противоречивые данные о влиянии энергетических напитков или кока-колы на окрашивание и возникновение эрозии зубной эмали [13, 20].

Более простым модельным экспериментом может стать модель *in vitro* с тест объектом скорлупой куриных яиц. Яичная скорлупа содержит не только кальций и фосфор, но и множество необходимых для организма элементов. Ее состав очень близок к составу костей и зубов человека [24]. Скорлупа яиц кур одной породы при одинаковых условиях содержания имеет идентичный химический состав и строение, что облегчит проведение экспериментальных исследований свойств различных напитков и интерпретацию полученных данных [25].

**Методология.** Цель работы – исследование влияния окрашенных напитков на состояние зубной эмали в модельном эксперименте с использованием скорлупы куриных яиц.

Для исследования использовали энергетические напитки, свежесваренный чай, яблочный сок и чайный напиток. Контролем служила питьевая вода. Энергетические напитки «Flash Up», «Burn», «Adrenaline Rush», яблочный сок «Сады Придонья», чай цейлонский черный байховый «Tess Sunrise», яйца куриные со скорлупой белого цвета «Роскар» были приобретены в розничной торговле г. Санкт-Петербурга.

Все энергетические напитки содержали в своем составе регулятор кислотности – лимонную кислоту, но отличались составом красителей, согласно информации в маркировке. «Flash Up» содержал E150d, рибофлавин, желтый хинолиновый; «Adrenaline Rush» – каротины; «Burn» – антоцианин, карамель.

Для приготовления настоя чая брали 3 г навески сухого чая, которую заливали 125 мл горячей воды и настаивали в течение 5 минут, после чего настой сливали в сосуд и сразу использовали в исследованиях. Чайный напиток был получен путем смешивания настоя чая и яблочного сока в соотношении 30/70.

Яйца куриные были тщательно вымыты, проколоты в двух местах для удаления содержимого белка и желтка, полученная яичная скорлупа была промыта и высушена. Скорлупа была помещена в химический стакан и залита определенным напитком и выдерживалась в нем в течение 14 суток. Контролем служил образец скорлупы, помещенный в питьевую воду. На каждые третьи сутки проводили замену исследуемого напитка на свежий образец. Исследование цвета, толщины и состояния поверхности яичной скорлупы проводили до и после окончания модельного эксперимента.

Колориметрический анализ цвета поверхности яичной скорлупы проводили на спектрофотометре CM-5 KONICA MINOLTA. Оценка цвета проводилась в системе CIE Lab – L\* (яркость), координаты цвета – a\* (от зелени [-] до красноты [+]) и b\* (от голубизны [-] до желтизны [+]), ΔE\* (общее цветовое различие) [5].

Состояние поверхности скорлупы определяли на микроскопном лабораторном комплексе ЛабоМед-2 с видеоокуляром TourCam 9.0 Mp и программным обеспечением Tour View. Исследование объектов проводилось методом светопольной микроскопии в отраженном свете с объективом 4-х кратного увеличения.

Толщину скорлупы определяли на толщиномере покрытий SaluTron ComBi D3. Прибор является комбинированным, реализует магнито-индукционный и вихретоковый методы контроля. Измерение проводили на одних и тех же участках скорлупы с подложкой алюминиевой фольги под измеряемые участки.

**Результаты.** Все образцы яичной скорлупы до проведения эксперимента имели одинаковые колориметрические характеристики. После окончания эксперимента контрольный образец не изменил своих колориметрических характеристик, о чем свидетельствует отсутствие общего цветового различия (табл. 1).

Под воздействием исследуемых окрашенных напитков происходило изменение колориметрических характеристик яичной скорлупы с различной интенсивностью. Это проявилось даже в тест-системах с различными энергетическими напитками. Так, энергетический напиток «Flash Up» повысил значения яркости (L\*) на 2%, «Adrenaline Rush» не оказал влияние на этот показатель, а «Burn» – снизил яркость на 6,6% по сравнению с начальными значениями. В результате общее цветовое различие (ΔE\*) в тест-системе с «Adrenaline Rush» изменилось меньше, чем с напитком «Flash Up», и фактически не фиксировалось невооруженным глазом. Наибольшее изменение цвета яичной скорлупы было в тест-системе с энергетическим напитком «Burn», что изменило его систему координат цвета. При визуальном осмотре яичной скорлупы после их выдержки в тест-системах с энергетическими напитками, незначительное изменение цвета зафиксировано только под действием напитка «Burn». По данным [5, 19] цветовое различие (ΔE\*) от 1,5 до 2,5 человеческого глаз не может фиксировать.

Таблица 1 – Колориметрические характеристики поверхности яичной скорлупы после окончания модельного эксперимента

Напиток	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	ΔE*
Вода питьевая (контроль)	94,59	-0,56	4,46	0,00
Энергетические напитки:				
«Flash Up»	96,47	-0,24	2,54	2,71
«Burn»	88,33	-1,04	2,17	6,69
«Adrenaline Rush»	94,67	0,00	5,77	1,42
Яблочный сок	89,76	0,29	13,08	9,91
Чай	66,99	8,40	29,64	38,42
Чайный напиток	78,03	6,67	27,81	29,53

Яблочный сок снизил яркость яичной скорлупы почти также как энергетический напиток «Burn», но общее цветовое различие (ΔE\*) было более выражено, что связано с интенсивностью желтого оттенка (b\*) до 13,08. Наибольшие изменения колориметрических

характеристик произошли под влиянием чая: яркость (L\*) снизилась на 41,2%, общее цветовое различие достигло 38,42 ед., в большей степени за счет желтизны (b\*). Композиция чая и яблочного сока в чайном напитке повысило его яркость (L\*) по

сравнению с настоем чая, в результате чего общее цветовое различие ( $\Delta E^*$ ) снизилось на 30%.

В зависимости от изменения колориметрических характеристик яичной скорлупы под влиянием напитков можно построить восходящий ряд: вода питьевая < «Adrenaline Rush» < «Flash Up» < «Burn» < яблочный сок < чайный напиток < чай.

Для скорлупы куриных яиц характерна неоднородность поверхности с некоторой бугристостью, которая сохраняется при ее выдержке в питьевой воде (рис.1). Действие энергетических напитков независимо от наименования приводило к выравниванию поверхности скорлупы. Похожее влияние на состояние поверхности скорлупы оказал яблочный сок, хотя незначительная неоднородность поверхности скорлупы осталась. Выравнивание поверхности скорлупы могло происходить за счет органических кислот, в частности лимонной кислоты, содержащихся в энергетических напитках и яблочном соке. Лимонная кислота обладает высоким потенциалом растворения

кристаллов гидроксиапатита за счет образования цитрата кальция и хелатирующего (связывающее кальций) действие лимонной кислоты, выводящего кальций из зубной эмали [14].

В отличие от энергетических напитков и яблочного сока настоем чая сохраняет исходную характерную неоднородность поверхности яичной скорлупы благодаря минимальному содержанию в нем органических кислот и более высокому содержанию фтора [14]. Чайный напиток занимает промежуточную позицию, частично сохраняя неоднородность поверхности яичной скорлупы.

Отсутствие неоднородности на поверхности яичной скорлупы после ее выдержки в энергетических напитках и яблочном соке значительно не изменило толщину скорлупы (табл. 2). Полученные изменения толщины не были статистически значимы, хотя имелась тенденция к ее уменьшению. Чай, чайный напиток и вода полностью сохранили исходные значения толщины.

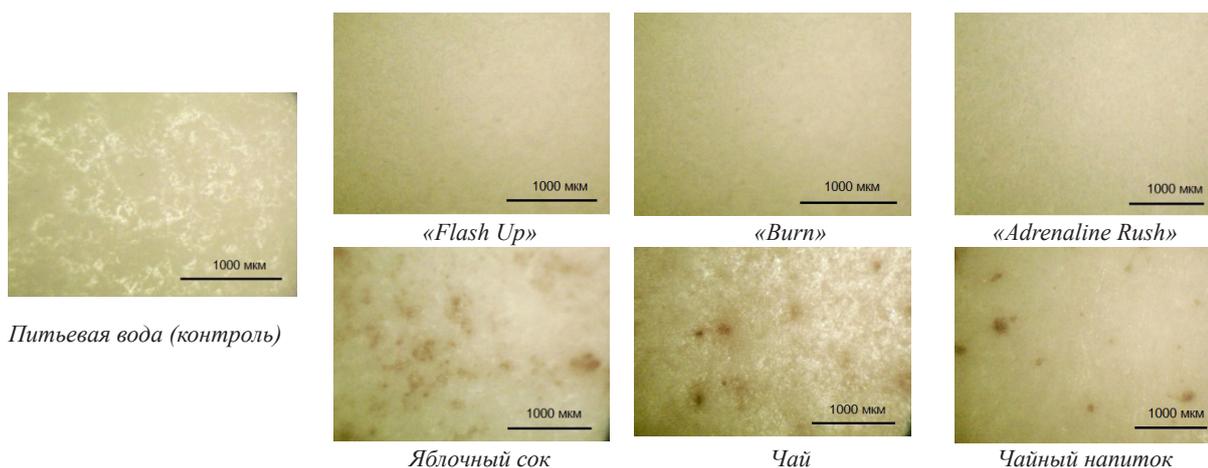


Рисунок 1 – Микрофотографии поверхности скорлупы куриных яиц после выдержки в модельных системах с исследуемыми напитками

Таблица 2 – Толщина яичной скорлупы, мкм, до и после выдержки в различных напитках

Напиток	Толщина скорлупы, мкм	
	исходная	после выдержки в напитках
Вода питьевая (контроль)	506 ± 1	506 ± 1
Энергетические напитки:		
«Flash Up»	529 ± 3	527 ± 3
«Burn»	551 ± 4	549 ± 2
«Adrenaline Rush»	507 ± 2	506 ± 2
Яблочный сок	542 ± 2	541 ± 1
Чай	509 ± 3	509 ± 2
Чайный напиток	524 ± 2	524 ± 3

**Обсуждение.** Оценка свойств окрашенных напитков в модельном эксперименте с использованием скорлупы куриных яиц подтверждает данные о разрушительном действии энергетических напитков и яблочного сока на эмаль человеческих зубов, опубликованных в открытой печати [13, 14-16, 18]. Предложенная нами модель *in vitro* с тест объектом скорлупой куриных яиц – более простая и доступная, чем модели на зубах. Выравнивание поверхности

скорлупы под воздействием энергетических напитков говорит об ее деминерализации за счет присутствия в составе напитков лимонной кислоты. Это подтверждают результаты, полученные авторами в моделях на зубах человека и животных при определении твердости зубной эмали после воздействия энергетических напитков [13-15]. По данным [13] все 10 исследованных энергетических напитков снижали твердость зубной эмали в 2,8-3 раза. Разрушитель-

ное действие энергетических напитков на зубную эмаль увеличивается из-за их газированности и присутствия сахара [15]. Наличие в яблочном соке сахаров и лимонной кислоты также способствовало сглаживанию поверхности скорлупы куриных яиц без изменения ее толщины. Снижению агрессивного воздействия яблочного сока на зубную эмаль может способствовать преобладание в ней яблочной кислоты с незначительным содержанием лимонной. В модели на зубах [18] под воздействием яблочного сока в течение 7 суток твердость зубной эмали снижалась на 20%, в то время как под воздействием апельсинового сока, в котором преобладает лимонная кислота, снижалась на 50%. На сохранность эмали влияет содержание фтора в напитках. Содержание фтора в чае может достигать до 10 мг/кг, что в сочетании с низким уровнем  $pH$  приводит к незначительной реминерализации зубной эмали (увеличение шероховатости на 8%). Отсутствие фтора в напитках, таких как кока-кола и низкое значение  $pH$  разрушают поверхность эмали (увеличение шероховатости до 37%) [14]. По-видимому, за счет этих факторов поверхность скорлупы сохранила свою бугристость после выдержки в настое чая, а в чайном напитке сохранилась частично.

Влияние окрашенных напитков на изменение цвета зубной эмали связано с концентрацией в них красящих веществ. Исследованные энергетические напитки имели окраску за счет разных пищевых красителей: «Flash Up» – рибофлавина и хинолинового желтого, «Burn» – антоцианов и карамели, «Adrenaline Rush» – каротинов. Только у напитка «Burn» за счет антоцианов формировался красный цвет, что и привело к более интенсивному изменению общего цветового различия  $\Delta E^*$  (табл. 1) по сравнению с остальными энергетическими напитками, окрашенными в желтый цвет. Похожие результаты были получены Al-Dharrab A. [26]. Энергетические напитки приводили к изменению цвета зубной эмали  $\Delta E^*$  менее 1,6 в течение 60-дневного воздействия. Изменение цвета эмали может усиливаться за счет эрозийного эффекта, что было продемонстрировано на примере безалкогольных напитков Кока-кола или Пепси-кола [27]. Чем больше концентрация красящих веществ в напитках, тем больше их влияние на цвет эмали зубов.

Соки содержат природные пигменты в высоких концентрациях, но их влияние на цвет зубной эмали различен. По данным [19] яблочно-морковный и апельсиновый соки после модельного эксперимента в течение 20-ти минут имели  $\Delta E^*$  менее 1,6, что не воспринимается человеческим глазом. Но соки могут быть получены из разного сырья, например, из разных сортов яблок, а также подвергнуты разной термической обработке, и могут отличаться составом пигментов. К тому же в нашем исследовании длительность модельного эксперимента составляла 14 суток, в результате чего произошло более значимое изменение общего цветового различия  $\Delta E^*$  скорлупы куриных яиц под воздействием яблочного сока.

Влияние свежесваренного чая на изменение цвета зубной эмали давно известно. Даже чайный напиток с содержанием экстракта черного чая 0,002% за 20 минут воздействия на зубную эмаль привел к изменению ее цвета –  $\Delta E^*$  составило 2,05 [19]. Настой чая интенсивно изменял цвет скорлупы, что подтверждают микрофотографии (рис. 1) и колориметрические характеристики ( $\Delta E^*=38,42$ ), представленные в таблице 1. При использовании комбинации яблочного сока и настоя чая в чайном напитке общее цветовое различие  $\Delta E^*$  скорлупы снизилось на 23,1% по сравнению с выдержкой в настое чая.

**Выводы.** Проведение исследований в модельном эксперименте с использованием скорлупы куриных яиц в качестве тест объекта позволило создать простую и доступную модель *in vitro* для оценки влияния окрашенных напитков на состояние зубной эмали. Полученные экспериментальные данные согласуются с результатами исследований в моделях на зубной эмали человека и животных, опубликованными в научной литературе.

Энергетические напитки «Flash Up», «Burn», «Adrenaline Rush» практически не оказывают влияния на колориметрические характеристики скорлупы куриных яиц, но изменяют состояние поверхности за счет ее сглаживания. Для яблочного сока характерна такая же тенденция с более интенсивным влиянием на колориметрические характеристики и меньшим на состояние поверхности скорлупы. Свежесваренный чай способствует изменению цвета скорлупы, но не влияет на состояние ее поверхности и толщину. Комбинация настоя черного байхового чая и яблочного сока (30/70) в чайном напитке приводит к меньшему влиянию на цвет скорлупы по сравнению со свежесваренным чаем, а также уменьшает агрессивное воздействие, приводящее к разрушению ее поверхности по сравнению с яблочным соком.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Добровлянин В.Д., Хацкелевич А.Н. Рынок безалкогольных напитков: современное состояние, перспективы развития и стратегия продвижения в продуктовом ритейле // Маркетинг в России и за рубежом. – 2021. – № 6. – С. 95-104.
2. Яковлева Т.В., Горлов С.М., Першакова Т.В., Рыбникова А.О. Разработка рецептур функциональных напитков с использованием натуральных красителей // Новые технологии. – 2021. – Т. 17. – № 3. – С. 59-70.
3. Нилова Л.П., Выговтов А.А., Малютенкова С.М. Растительное сырье в формировании антиоксидантных свойств сокодержавных напитков // Международный научный журнал. – 2017. – № 4. – С. 83-87.
4. Нилова Л.П., Малютенкова С.М., Арсирый А.Г. Нутриенты апельсиновых соков и нектаров. Роль в формировании антиоксидантных свойств // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. – 2021. – Т. 9. – № 3. – С. 72-80.
5. Bazzi Ju. Z., Bindo M. J. F., Rached R. N., Mazur R. F., Vieira S., de Souza E. M. The effect of at-home bleaching and toothbrushing on removal of coffee and cigarette smoke stains and color stability of enamel // J. Am. Dent. Assoc. – 2012. – № 143(5). – P. e1-e7.
6. Attia M.L., Aguiar F.H.B., Mathias P., Ambrosano G.M.B., Fontes C.M., Liporoni P.Ch.S. The effect of coffee solution on

tooth color during home bleaching applications // Am. J. Dent. – 2009. – № 22(3). – P. 175-179.

7. Kobayashi R. S., Picolo M. Z. D., Kury M., de Almeida Resende B., Florez F. L. E., Cavalli V. Effects of dental bleaching protocols with violet radiation on the color and chemical composition of stained bovine enamel // Photodiagnosis and Photodynamic Therapy. – 2021. – № 34. – 102194.

8. Alqahtani S., Abusaq A., Alghamdi M., Shokair N., Al-bounni R. Colour stability of resin infiltrated white spot lesion after exposure to stain-causing drinks // Saudi Journal of Biological Sciences. – 2022. – № 29. – P. 1079-1084.

9. Abd-elmonsif N. M., El-Zainy M. A., Abd-elhamid M. M. Comparative study of the possible effect of bovine and some plantbased milk on cola-induced enamel erosion on extracted human mandibular first premolar (scanning electron microscope and X-ray microanalysis evaluation) // Future Dental Journal. – 2017. – № 3. – P. 22-27.

10. Tulek A., Saeed M., Mulic A., Stenhagen K. R., Utheim T. P., Galtung H. K., Khuu C., Nirvani M., Kristiansen M. S., Sehic A. New animal model of extrinsic dental erosion-Erosive effect on the mouse molar teeth // Archives of Oral Biology. – 2018. – № 96. – P. 137-145.

11. Li P., Oh Ch., Kim H., Chen-Glasser M., Park G., Jetybayeva A., Yeom J., Kim H., Ryu J., Hong S. Nanoscale effects of beverages on enamel surface of human teeth: An atomic force microscopy study // Journal of the mechanical behavior of biomedical materials. – 2020. – № 110. – 103930.

12. Муслев С.А., Арутюнов С.Д., Хуршудян С.А., Егорова О.С. Соки и безалкогольные напитки: влияние на состояние зубов потребителя // Пиво и напитки. – 2020. – № 1. – С. 34-38.

13. Matumoto M.S.S., Terada R.S.S., Higashi D.T., Fujimaki M., Suga S.S., Guedes-Pinto A.C. In vitro Effect of Energy Drinks on Human Enamel Surface // Rev. Odontol. UNESP. – 2018. – № 47. – P. 57-62.

14. Jameel R.A., Khan S.S., Rahim Z.H.A., Bakri M.M., Siddiqui S. Analysis of Dental Erosion Induced by Different Beverages and Validity of Equipment for Identifying Early Dental Erosion, in vitro Study // J. Pak. Med. Assoc. – 2016. – № 66. – P. 843-848.

15. Haghgou H.R., Haghgoo R., Asdollah F. M. Comparison of the microhardness of primary and permanent teeth after immersion in two types of carbonated beverages // Journal of International Society of Preventive and Community Dentistry. – 2016. – Vol. 6. – № 4. – P. 344-348.

16. Melo E. S. P., Melo E. Arakaki D., Michels F., Nascimento V. A. Methodology to Quantify and Screen the Demineralization of Teeth by Immersing Them in Acidic Drinks (Orange Juice, Coca-Cola™, and Grape Juice): Evaluation by ICP OES // Molecules. – 2021. – 26(11). – P. 3337.

17. Grobler S. R., Senekal P. J., Laubscher J. A. In vitro demineralization of enamel by orange juice, apple juice, Pepsi Cola and Diet Pepsi Cola // Clinical Preventive Dentistry. – 1990. – № 12 (5). – P. 5-9.

18. Mesquita-Guimarães K.S.F., Scatena C., Borssato M.C., Rodrigues-Junior A.L., Serra M.C. Effect of Foods and Drinks on Primary Tooth Enamel after Erosive Challenge with Hydrochloric Acid // Braz. Oral Res. – 2015. – № 29. – P. 1-7.

19. Min Ji-H., Kim Bo-Ra, Kim B.-I. Optical detection of the potential for tooth discoloration from children's beverages by quantitative light-induced fluorescence technology // Photodiagnosis and Photodynamic Therapy. – 2021. – № 34. – 102240.

20. Фирсова И.В., Македонова Ю.А., Камалетдинова Р.С., Кобелев Е.В. Влияние газированных и алкогольных напитков на зубы // Журнал научных статей здоровье и образование в XXI веке. – 2014. – Т. 16. – № 3. – С. 12-14.

21. Ferrazzano G. F., Amato I., Ingenito A., De Natale A., Pollio A. Anti-cariogenic effects of polyphenols from plant stimulant beverages (cocoa, coffee, tea) // Fitoterapia. – 2009. – № 80. – P. 255-262.

22. Rusminah N., Rachmawati E., Carolina D. N., Hendiani I. Anti-Cariogenic Effects of Raw Robusta Coffee Bean Compared To Instant Robusta Coffee Powder through Dental Biofilm Inhibition // International Journal of Medical Science and Clinical Invention. – 2019. – № 6(1). – P. 4247-4250.

23. Даджунц Л.В., Сывороткина Д.Д. Изменение эмали в возрастном аспекте // Бюллетень медицинских интернет-конференций. – 2018. – Т.8. – № 7. – С. 296-298.

24. Аскарлов И.Р., Атакулова Н. Б. К., Одилжонов Х. А.,

Мамазокирова В. Г. Химический состав и целебные свойства яичной скорлупы // Oriental Renaissance: innovative, educational, natural and social sciences. – 2022. – Т. 2. – №2. – С. 483-487.

25. Цой З.В., Васильева Н.В. Влияние нетрадиционных кормовых добавок на яичную продуктивность кур-несушек // Вестник КрасГАУ. – 2021. – № 2. – С. 118-122.

26. Al-Dharrab A. Effect of Energy Drinks on the Color Stability of Nanofilled Composite Resin // Journal of Contemporary Dental Practice. – 2013. – № 14 (4). – P. 704-711.

27. Adusumilli H., Avula J. S. S., Kakarla P., Bandi S., Mallela G. M. K., Vallabhaneni K. Color stability of esthetic restorative materials used in pediatric dentistry: An in vitro study // Journal of the Indian Society of Pedodontics & Preventive Dentistry. – 2016. – № 34 (3). – P. 233-237.

*Статья поступила в редакцию 29.07.2022*

*Статья принята к публикации 16.09.2022*

УДК 613.221, 641.053.2

DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0016

**ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛИДЕКСТРОЗЫ В ПИТАНИИ ДЕТЕЙ РАННЕГО ВОЗРАСТА**

© Автор(ы) 2022

ORCID: 0000-0002-1770-4456

**ФОМИЧЕВА Дарья Андреевна**, аспирант*Университет ИТМО**(197101, Россия, Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, дом 49, лит. А., e-mail: dashafom19@mail.ru)*

ORCID: 0000-0002-0642-3325

ResearcherID: ABA-7956-2020

ScopusID: 57212340331

**МЕЛЬЧАКОВ Роман Максимович**, аспирант*Университет ИТМО**(197101, Россия, Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, дом 49, лит. А., e-mail: romanmelchakov@mail.ru)*

SPIN: 1952-6859

AuthorID: 934676

ORCID: 0000-0001-9118-1449

ResearcherID: V-3692-2019

ScopusID: 57197822533

**ЛЕПЕШКИН Артем Ильич**, кандидат технических наук*Университет ИТМО**(197101, Россия, Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, дом 49, лит. А., e-mail: artyom.lepeshkin@gmail.com)*

**Аннотация.** Пищевые волокна являются неотъемлемой частью полноценного питания и здоровья как взрослых, так и детей. Женское грудное молоко богато разнообразными олигосахаридами, однако, дети раннего возраста, находящиеся на искусственном вскармливании, могут испытывать их дефицит в связи с тем, что большинство обычных адаптированных смесей не содержит в составе пребиотиков. В других молочных смесях, несмотря на большое количество безопасных и одобренных пищевых волокон, для обогащения используются всего три вида олигосахаридов: фруктоолигосахариды, галактоолигосахариды и инулин. Полидекстроза является пребиотиком и обладает полифункциональными свойствами. Поэтому целью данного исследования является определение перспектив применения пищевого волокна полидекстрозы в составе продуктов питания для детей раннего возраста. В статье приведен обзор существующих исследований по применению полидекстрозы в качестве пребиотика для детей с рождения до 4 лет. Рассмотренные исследования определили, что полидекстроза является перспективным и безопасным ингредиентом для обогащения детских продуктов пищевыми волокнами, она переносится аналогично уже применяемому в детском питании олигосахаридам, обеспечивая более мягкий стул, увеличение бифидогенной микрофлоры в желудочно-кишечном тракте, нормальный рост и развитие детей. И хотя в приведенных исследованиях полидекстроза успешно применялась в комплексе с другими пребиотиками, она также может применяться самостоятельно для обогащения детских продуктов пищевыми волокнами.

**Ключевые слова:** полидекстроза, пищевые волокна, пребиотики, галактоолигосахариды, дети раннего возраста, младенцы, адаптированные молочные смеси, последующие адаптированные молочные смеси.

**PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF POLYDEXTROSE IN THE NUTRITION  
OF INFANT CHILDREN**

©The Author(s) 2022

**FOMICHEVA Daria Andreevna**, post-graduate student  
**MELCHAKOV Roman Maksimovich**, post-graduate student  
**LEPESHKIN Artem Ilyich**, phd*ITMO University**(197101, Russia, Saint-Petersburg, Kronverksky avenue, 49 A,**e-mails: dashafom19@mail.ru, romanmelchakov@mail.ru, artyom.lepeshkin@gmail.com)*

**Abstract.** Dietary fiber is an essential part of good nutrition and health for both adults and children. Human breast milk is rich in a variety of oligosaccharides; however, bottle-fed infants may experience a deficiency due to the fact that most conventional infant and follow-on milk formulas do not contain prebiotics. In other milk formulas, despite the large amount of safe and approved dietary fiber, only three types of oligosaccharides are used for fortification: fructooligosaccharides, galactooligosaccharides and inulin. Polydextrose is a prebiotic and has multifunctional properties. Therefore, the purpose of this study is to determine the prospects for the use of dietary fiber polydextrose in the composition of food products for young children. The article provides an overview of existing studies on the use of polydextrose as a prebiotic for children from birth to 4 years old. It is determined that polydextrose is a promising and safe ingredient for enriching children's products with dietary fiber, it is tolerated similarly to oligosaccharides already used in baby food,

providing softer stools, an increase in bifidogenic microflora in the gastrointestinal tract, normal growth, and development of children. And although polydextrose has been successfully used in combination with other prebiotics in the studies cited, it can also be used on its own to enrich children's foods with dietary fiber.

**Keywords:** polydextrose, dietary fiber, prebiotics, galactooligosaccharides, toddlers, infants, infant milk formulas, follow-on milk formulas.

*Для цитирования:* Фомичева Д.А. Перспективы применения полидекстрозы в питании детей раннего возраста / Д.А. Фомичева, Р.М. Мельчаков, А.И. Лепешкин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022. – Т. 11. – № 3(59). – С. 109-115. – DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0016.

**Введение.** Высокомолекулярные углеводы растительного происхождения, пищевые волокна, играют важную роль в питании как взрослого человека, так и ребенка. Согласно определению из МР 2.3.1.0253-21 «Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации» пищевые волокна – это высокомолекулярные углеводы, главным образом растительной природы, и ассоциированные растительные вещества, устойчивые к перевариванию и адсорбции в тонком кишечнике человека, полностью или частично ферментируемые в толстом кишечнике.

Пищевые волокна по физиологическим функциям подразделяются на два вида в зависимости от растворимости в воде. Так, нерастворимые полисахариды, к которым относятся целлюлоза, гемицеллюлоза и лигнин, являются энтеросорбентами и могут предупреждать развитие кариеса; растворимые пищевые волокна, такие как пектин, альгинаты, полидекстроза и другие влияют на уровень глюкозы и инсулина, связывают и выводят тяжелые металлы из организма, косвенно влияют на метаболизм холестерина и липидов, а также обладают пребиотическими свойствами [1].

Пищевые волокна не расщепляются в верхних отделах пищеварительного тракта и в неизменном виде попадают в толстую кишку, где микроорганизмы метаболизируют их до короткоцепочечных жирных кислот, которые являются субстратом для колоноцитов, отвечающих за стимуляцию пролиферации клеток, образование слизи и кровотока в слизистой оболочке [2], таким образом они регулируют состав полезной микрофлоры кишечника и стимулируют ее рост и развитие. Пребиотики регулируют моторную деятельность кишечника: удерживают воду, тем самым влияя на осмотическое давление в просвете желудочно-кишечного тракта, электролитный состав кишечного содержимого и массу фекалий [3], стимулируют желчеотделение, обладают сорбционными свойствами, связывают соединения тяжелых металлов [4].

Источником пищевых волокон для детей раннего возраста является грудное молоко или адаптированная молочная смесь при искусственном вскармливании, а впоследствии прикорм растительного происхождения. Грудное молоко богато олигосахаридами, они составляют от 10 до 19% общего содержания углеводов [5]. Олигосахариды женского молока включают в себя до 200 видов полисахаридов. При потреблении 800 мл грудного молока ребенок получает 10 г

олигосахаридов в день [6]. Олигосахариды грудного молока участвуют в процессах формирования иммунитета у ребенка, барьерной функции кишечника и защиты от патогенных микроорганизмов, снижая частоту бактериальных, вирусных или паразитарных кишечных заболеваний, путем связывания с патогенами или их токсинами и ингибирования их прилипания к глюконовым лигандам на поверхности клеток слизистой оболочки [7, 8]. При переходе на искусственное вскармливание у ребенка может возникнуть дефицит пищевых волокон, так как стандартные адаптированные молочные смеси их не содержат, поэтому при выборе смеси важно обращать внимание на их содержание в составе.

Недостаточное поступление пищевых волокон приводит к ряду патологических состояний, большая часть которых связана с уменьшением микробного разнообразия в кишечнике. Что в свою очередь отражается на самочувствии ребенка – боли в животе, запоры. Лечение функциональных запоров у детей первого года жизни включает в себя диетотерапию, а при необходимости и медикаментозное лечение. Одним из основных принципов в данной диетотерапии является добавление в рацион продуктов обогащенных оптимальным соотношением пищевых волокон [9].

У младенцев, потребляющих обычные молочные смеси микрофлора желудочно-кишечного тракта отличается от младенцев, находящихся на грудном вскармливании. Имеются доказательства, что добавление пребиотиков в состав детских продуктов позволяет развить микробиоту желудочно-кишечного тракта младенцев, находящихся на искусственном вскармливании, до уровня микробиоты детей на грудном вскармливании. При этом риск нежелательных явлений при применении пребиотиков крайне низок [10]. Также, считается, что пищевые волокна, добавляемые в детское питание, могут предотвращать чувствительность младенцев к пищевым аллергенам, однако недостаточно доказательств, чтобы определить роль пребиотиков в механизме профилактики аллергических заболеваний и гиперчувствительности к пищевым продуктам [11].

В 2016 году FDA (U.S. Food and Drug Administration / Управление по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов – агентство Министерства здравоохранения и социальных служб США) опубликовало определение пищевых волокон и выпустило список из семи полисахаридов с доказанной пользой для здоровья, в который вошли целлюлоза и

пектин. Через два года первый список был дополнен еще восемью ингредиентами, в который вошли такие вещества как альгинат, инулин, галактоолигосахариды (ГОС) и полидекстроза [12].

Несмотря на большое разнообразие одобренных пищевых волокон, безопасность и функциональность которых была доказана, в детском питании используются в основном только три вида. В адаптированных и последующих молочных смесях пребиотики прежде всего представлены фруктоолигосахаридами (ФОС) и галактоолигосахаридами (ГОС), в специализированных смесях для диетического лечебного и диетического профилактического питания чаще используют инулин.

Полидекстроза, больше известная как пищевая добавка E1200, имеет среднюю степень полимеризации и относится к группе полисахаридов. Она обладает полифункциональными свойствами, выступая в продукте в роли стабилизатора, загустителя, влагоудерживающего агента и прежде всего в качестве пищевого волокна, так как проявляет характерные для пищевых волокон свойства: устойчивость к расщеплению в желудке и тонком кишечнике, способность увеличивать содержимое кишечника, сокращать время транзита через кишечник и снижать уровень глюкозы и холестерина в крови [13]. Полидекстроза является более экономически выгодной по сравнению с фруктоолигосахаридами, галактоолигосахаридами, и инулином. Она примерно в 3-5 раз дешевле ФОС и ГОС и в 6-7 раз дешевле инулина. Ее калорийность составляет всего 1 ккал/г. Более того, в отличие от ГОС, который представлен на российском рынке исключительно в жидком виде, полидекстроза доступна в сухом виде.

**Методология.** Целью данной работы является определение перспектив применения пищевого волокна полидекстрозы в составе продуктов питания для детей раннего возраста.

В работе использованы общепринятые методы анализа литературы отечественных и зарубежных авторов. Для рассмотрения полидекстрозы в качестве пищевого волокна, применительно у детей раннего возраста изучались научные статьи, описывающие рандомизированные и квазирандомизированные контролируемые испытания, в которых использование пребиотика полидекстрозы или смеси полидекстрозы с другими пищевыми волокнами в питании сравнивали с отсутствием пребиотиков, или с другими пребиотиками, а также грудным вскармливанием. Критериями оценки в данных исследованиях служили характеристики стула, диарея, фекальная микробиота, рост, индекс массы тела и частота нежелательных явлений.

Объект исследования – современные научные данные по использованию пищевого волокна полидекстрозы.

**Результаты.** Согласно МР 2.3.1.0253-21 физиологическая потребность в пищевых волокнах для детей старше 1 года составляет 10-22 г /сутки, а если быть

точнее то от одного года до двух требуется 10 г/сутки, от трех до шести лет – 12 г/сутки. Нормы для детей первого года жизни не нормируются, но логически следует, что суточная доза не должна превышать 10 г/сутки. FDA же установили более высокие нормы потребления пищевых волокон для детей от одного года до трех лет в количестве 14 г/сутки (основываясь на диете в 1000 ккал/сутки), иными словами нормы составили 14г /1000 ккал [14].

Для обогащения рациона и удовлетворенияточной потребности детей в пищевых волокнах пребиотики могут как добавляться в адаптированную молочную смесь и другие продукты детского питания, так и употребляться отдельно в качестве пищевых добавок. Например, в рандомизированном двойном слепом плацебо контролируемом исследовании по определению влияния пребиотиков и пробиотиков на недоношенных детей младенцами давали пребиотическую смесь отдельно от основного питания. В исследовании принимали участие 94 младенца, которые были разделены на 3 группы для получения в течении двух месяцев пребиотической смеси галактоолигосахаридов и полидекстрозы в соотношении 1:1 в количестве 600 мг/день разово с 1 по 30 день и по 600 мг дважды в день с 31 по 60 день; пробиотика *Lactobacillus rhamnosus GG* в количестве 1 дозы в сутки  $10^9$  КОЕ с 1 по 30 день и в количестве 2 доз в сутки по  $10^9$  КОЕ с 31 по 60 день; а также плацебо, которым являлась микрокристаллическая целлюлоза и декстрозы ангидрид. После двухмесячной терапии младенцы наблюдались в течение года. Критериями оценки служили раздражительность, плач, рост и фекальная микрофлора.

В группе плацебо наличие в стуле бактерий группы *Clostridium histolyticum*, было на 5% выше, чем в группе пробиотиков. Частота стула (количество дефекаций больше 3 раз) в группе, получавшей пребиотики, была на 20% выше, чем в группе пробиотиков и группе плацебо, однако различий в консистенции не было. Нежелательных явлений, связанных с потреблением любой из добавок, не наблюдалось. В возрасте 1 года средний вес и рост в разных группах не имели существенных различий.

Всего 29% детей были классифицированы как чрезмерно кричащие, при этом в группах, получавших пребиотики и пробиотики их количество было значительно меньше. Видовой состав бифидобактерий среди чрезмерно кричащих детей и довольных также различался: количество *Bifidobacterium infantis* в стуле у кричащих детей было снижено. Это доказывает, что раннее введение пребиотиков и пробиотиков может облегчить симптомы, вызывающие плач и беспокойство у недоношенных детей [15].

Однако, пищевые волокна редко используются как отдельные добавки к пище, так как их рациональнее добавлять сразу в адаптированную молочную смесь или другой продукт детского питания. Существует ряд исследований, в которых дети раннего возраста употребляли адаптированные начальные и

последующие молочные смеси, обогащенные пребиотиками. Данные испытания были направлены на определение толерантности детей к смесям с пребиотиками, а также их влияние на рост, вес, характер и качество стула.

В одном таком исследовании, разработанном для оценки влияния различных комбинаций пребиотиков на рост и толерантность, принимали участие 226 здоровых доношенных детей, которых случайным образом распределили на три группы. Контрольная группа из 76 младенцев, потребляла стандартную молочную смесь. Вторая группа, 74 младенца, потребляли контрольную смесь, обогащенную смесью полидекстрозы и ГОС в соотношении 1:1 в количестве 4 мг/л. Третья группа, состоящая из 76 младенцев, потребляла контрольную смесь, обогащенную смесью полидекстрозы, ГОС и лактулозы в соотношении 50:33:17 в количестве 8 мг/л. Исследование проводили с 14 по 120 день жизни.

По результатам исследования существенных различий по скорости роста веса и длины между групп не наблюдалось. Были обнаружены значительные различия в консистенции стула: группы, получавшие пребиотики, имели более жидкий стул, чем контрольная группа. В третьей группе до 30-дневного возраста наблюдалась более высокая частота стула, по сравнению со второй и контрольной группой, однако в возрасте 60 дней и старше показатель был одинаковым у всех групп. Из нежелательных явлений диарея чаще наблюдалась у младенцев, потребляющих смесь полидекстрозы и ГОС по сравнению с контролем; экзема наблюдалась чаще у второй группы, по сравнению с третьей группой и контролем; раздражительность была выше у третьей группы по сравнению с контролем. Младенцы, потребляющие смесь содержащую пребиотики, несмотря на редкое проявление нежелательной реакции, достигли нормального роста и характеристики стула, сходного с детьми, находящимися на грудном вскармливании, по сравнению с детьми не употреблявшими пребиотики. [16].

В аналогичном многоцентровом рандомизированном двойном слепом проспективном исследовании оценивались рост и толерантность здоровых младенцев к адаптированной молочной смеси, обогащенной пребиотической смесью полидекстрозы и галактоолигосахаридов. Данное исследование, также проводилось с 14 до 120-дневного возраста. В испытании принимали участие 419 младенцев. Контрольная группа, 142 ребенка, получали обычную адаптированную молочную смесь на основе коровьего молока. Первая исследовательская группа, 139 детей, получали такую же адаптированную молочную смесь, дополненную пребиотической смесью полидекстрозы и галактоолигосахаридов в соотношении 1:1 в количестве 4 г/л. Вторая контрольная группа, 138 детей, получали адаптированную молочную смесь, дополненную только галактоолигосахаридами в количестве 4 г/л. За время исследования с 14 до 120

дневного возраста не было выявлено групповых различий в скорости роста и частоте нежелательных явлений. Обе смеси, дополненные пищевыми волокнами, хорошо переносились: беспокойство и газообразование не наблюдалось. У младенцев, получавших смеси, в которые были добавлены пищевые волокна, консистенция стула была лучше, более мягкой, как у младенцев на грудном вскармливании, по сравнению с контрольной группой [17].

В другом двойном рандомизированном исследовании у доношенных детей изучалось влияние адаптированной молочной смеси с полидекстрозой и ГОС на фекальную микробиоту, и секреторный иммуноглобулин *IgA (sIgA)*. В течение 60 дней в исследовании принимали участие 289 младенцев, из которых 101 ребенок получал контрольную обычную адаптированную молочную смесь на коровьем молоке, а 100 детей получали эту же смесь с добавленной смесью полидекстрозы и галактоолигосахаридов в соотношении 1:1 в количестве 4 г/л. В качестве контрольной группы были включены 88 младенцев, находящихся на грудном вскармливании. У младенцев, получавших адаптированную смесь с полидекстрозой и ГОС стул всегда был более мягкий по сравнению с контрольной группой. Состав фекальной микробиоты у младенцев, получавших смесь с пищевыми волокнами, был приближен к контрольной группе, однако при этом общее количество бифидобактерий и *Bifidobacterium longum* было выше, чем в контроле на 30 день, и значительно выше на 60 день. Содержание *B.infantis* значительно превышало содержание в контрольной группе через 30 дней. Существенных различий в изменениях от исходного уровня до 60 дней иммуноглобулина *IgA (sIgA)* между контрольной группой и группой, получавшей адаптированную смесь с полидекстрозой и ГОС, не было обнаружено [18].

Дети в возрасте 4-6 месяцев начинают получать прикорм. Однако несмотря на введение прикорма, у детей наблюдается недостаточное потребление овощей, фруктов и зерновых продуктов, что приводит к дефициту пищевых волокон в рационе. Поэтому детям раннего возраста особенно важно обеспечивать физиологическую потребность в пребиотиках.

Так, в рандомизированном исследовании, проводимом в детском саду, оценивались диарея и консистенция стула. 133 здоровых ребенка от 9 до 48 месяцев в течение 108 дней на завтрак и полдник получали по порции, 245 мл, последующей молочной смеси или последующей молочной смеси, обогащенной 1г пребиотической смеси полидекстрозы и галактоолигосахаридов (4,08 г/л). Предполагаемое ежедневное потребление пищевых волокон, за исключением пребиотиков, добавленных в последующую молочную смесь, составило 9,2 г в исследуемой группе и 8,9 г в контрольной группе, что соответствует физиологическим нормам для детей данного возраста. В обеих группах не было отличий по индексу массы тела, частоте нежелательных явлений,

шансам заболеть диареей и острой респираторной инфекцией. Обе смеси хорошо переносились детьми. Однако у группы детей, получавших обогащенную пребиотиками смесь были более высокие шансы на усиление дефекации, чем у контрольной группы [19].

Во всех рассмотренных исследованиях здоровые

доношенные младенцы и дети от 9 до 48 месяцев употребляли пребиотическую смесь полидекстрозы и галактоолигосахаридов, в соотношении 1:1, в концентрации 4 г/л, недоношенным младенцев давалась более низкая дозировка в количестве 600 мг/день и 1200 мг/день (табл.1).

Таблица 1 – Рассмотренные исследования о применении полидекстрозы

№ п/п	Количество детей	Возраст	Пищевая добавка и продукт	Доза пищевых волокон	Контролируемые параметры / Обнаруженные эффекты	Источник
1	94	Недоношенные младенцы с возрастом с 1 по 3 день Период исследования 2 месяца и наблюдения до возраста 1 года	Пребиотическая смесь ГОС и полидекстрозы в соотношении 1:1 (n=31)	600 мг/день разово с 1 по 30 день; по 600 мг дважды в день с 31 по 60 день	Плач и раздражительность, рост и фекальная микрофлора. Различий в росте и весе, а также наличия нежелательных явлений не наблюдалось. Частота дефекации была выше у группы, получавшей пребиотики, но консистенция стула у всех групп была одинаковой. Количество чрезмерно кричащих детей было ниже в группах, получавших пре- и пробиотики.	[15]
			Пробиотика <i>Lactobacillus rhamnosus</i> GG (n=31)	1 доза в сутки 10 <sup>9</sup> КОЕ с 1 по 30 день; 2 дозы в сутки 10 <sup>9</sup> КОЕ с 31 по 60 день		
			Плацебо – микрокристаллическая целлюлоза и декстрозы ангидрид (n=32)	-		
2	226	Доношенные младенцы возрастом 14 дней Период исследования с 14 дня по 120 день жизни	Стандартная молочная смесь (n=76)	-	Скорость роста веса и длины, консистенция стула. Различий в росте и весе не наблюдалось. У детей старше 60 дней характер стула был одинаково нормальным. Частота нежелательных явления была выше у детей, потребляющих пребиотики.	[16]
			Стандартная смесь, обогащенная полидекстрозой и ГОС (1:1) (n=74)	4г/л		
			Стандартная смесь, обогащенная смесью полидекстрозы, ГОС и лактулозы в соотношении 50:33:17 (n=76)	8г/л		
3	419	Младенцы 14-120 дней Период исследования с 14 до 120 дней	Обычная детская смесь (n=142)	-	Консистенция стула, антропометрические исследования, подтвержденные нежелательные явления. Различий в скорости роста не было Беспокойство и газообразование не наблюдалось. Консистенция стула была выше (более мягкий стул) у младенцев, получавших смеси, содержащие пищевые волокна, схожая с младенцами, находящимися на грудном вскармливании. Частота нежелательных явлений была одинаковой.	[17]
			Исследовательская формула с пребиотической смесью полидекстрозы и ГОС в соотношении 1:1 (n=139)	4г/л		
			Исследовательская формула с ГОС (n=138)	4г/л		
4	289 (230 завершили)	Доношенные младенцы возрастом 21-30 дней Период исследования 60 дней	Обычная детская смесь; (n=101)	-	Фекальная микробиота и секреторный IgA (sIgA). Фекальная микробиота приближена к грудному вскармливанию. Общее количество бифидобактерий и <i>Bifidobacterium longum</i> было выше у младенцев, потребляющих пребиотики, по сравнению с контролем. Различий в изменении иммуноглобулина не обнаружено	[18]
			Исследовательская формула с пребиотической смесью полидекстрозы и ГОС в соотношении 1:1; (n=100)	4г/л		
			Грудное вскармливание (n=88)	-		
5	133 (129 завершили исследование)	Дети от 9 до 48 месяцев Период исследования 108 дней	Последующая смесь на основе коровьего молока (n=67)	-	Диарея, характер стула, рост. Отличий по индексу массы тела, шансам заболеть диареей и острой респираторной инфекцией, частоте нежелательных явлений обнаружено не было. У детей, получавших смесь с пребиотиками был выше шанс усиления дефекации.	[19]
			Последующая смесь на основе коровьего молока, обогащенная пребиотической смесью полидекстрозы и галактоолигосахаридов (n=62)	1г на 245мл (4,08г/л)		

**Обсуждение.** При нормальном уровне потребления полидекстроза проявляет физиологические свойства, аналогичные свойствам других пищевых волокон. Однако чрезмерное потребление неперевариваемых углеводов может привести к расстройству желудочно-кишечного тракта. Объединенный комитет экспертов ФАО/ВОЗ по пищевым добавкам (*JECFA*) и Научный комитет Европейской комиссии по пищевым продуктам (*EC/SCF*) определили, что средний порог слабительного действия полидекстрозы составляет 90 г/сут или (1,3 г/кг), или разовое употребление 50 г [20, 21].

Рассмотренные исследования определили, что полидекстроза переносится также хорошо, как и уже применяемые в практике детского питания пребиотики: ФОС, ГОС и инулин. Это связано с тем, что полидекстроза имеет высокую молекулярную массу и частично ферментируется в толстой кишке, что снижает риск осмотической диареи.

Адаптированные молочные смеси, обогащенные пребиотической смесью из полидекстрозы и галактоолигосахаридов, а также отдельно принятые пищевые добавки, содержащие данную смесь, предупреждают развитие запоров и не допускают развитие диареи, обеспечивают более мягкий стул, рост бифидогенной микрофлоры в желудочно-кишечном тракте, в частности *Bifidobacterium longum*, и снижение симптомов, вызывающих плач и беспокойство ребенка, при этом не оказывая негативного влияния на скорость роста и набор веса. Младенцы, потребляющие пребиотическую смесь, в состав которой входит полидекстроза, в количестве 4 г/л, имеют фекальную и желудочно-кишечную микробиоту сходную с младенцами, находящимися на грудном вскармливании. И хотя в приведенных исследованиях полидекстроза успешно применялась в комплексе с другими пребиотиками, она также может применяться самостоятельно для обогащения детских продуктов.

Полидекстроза не производится в России, и представлена на внутреннем рынке за счет импорта в основном из Китая. Китай является одной из основных стран по производству полидекстрозы и экспортирует данный ингредиент примерно в 50 стран мира. Примерные объемы экспорта в Россию составляют более 100 тонн в год.

Благодаря тому, что полидекстроза представлена в порошкообразной форме, ее удобно вносить в жидкие смеси для распылительной и сублимационной сушки, а также использовать при производстве продуктов методом сухого смешивания.

На территории Российской Федерации уже существует несколько патентов, зарегистрированных на российские представительства зарубежных производителей, на педиатрические и молочные смеси, в состав которых входит полидекстроза в качестве пребиотика [22, 23, 24, 25], однако на данный момент практического ее использования в составе детских продуктов питания не наблюдается.

Тем не менее на практике данное пищевое волокно начинает внедряться в состав детских пищевых продуктов: американским мировым производителем *Mead Johnson Nutrition* была разработана первая адаптированная сухая молочная смесь *Enfamil® Reguline® Infant Formula with Prebiotics*, в состав которой в качестве пищевых волокон входит полидекстроза.

**Выводы.** Состав и количество олигосахаридов, характерных для грудного молока, пока что не воспроизводятся в детских смесях. Однако расширение видов пищевых волокон, применяемых в продуктах питания для детей раннего возраста, могут ускорить этот процесс.

В России нет производства полидекстрозы, и данный ингредиент импортируется из Китая. Потребность российского рынка составляет 100 тонн в год и с каждым годом увеличивается на 20%.

Полидекстроза является перспективным, безопасным и полифункциональным ингредиентом для обогащения детских продуктов пищевыми волокнами благодаря своим пребиотическим свойствам и доступности, и может быть использована самостоятельно для обогащения детских продуктов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. МР 2.3.1.0253-21. 2.3.1. Гигиена питания. Рациональное питание. Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации. Методические рекомендации (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 22.07.2021) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.rospotrebnadzor.ru/upload/iblock/789/1.-mr-2.3.1.0253\\_21-normy-pishchevykh-veshchestv.pdf](https://www.rospotrebnadzor.ru/upload/iblock/789/1.-mr-2.3.1.0253_21-normy-pishchevykh-veshchestv.pdf)
2. Программа оптимизации питания детей в возрасте от 1 года до 3 лет в Российской Федерации: методические рекомендации / ФГАУ «НМИЦ здоровья детей» Минздрава России. – М.: б. и., 2019. – 36с.
3. Бородулина, Т.В. Значение овощей и фруктов в питании детей: пищевые волокна / Т.В. Бородулина, А.В. Суржик // Вопросы детской диетологии. – 2008. – Т. 6. – № 4. – С. 73-76/
4. Кондрашина, В. В. Пищевые волокна и их роль в формировании здоровья человека / В. В. Кондрашина // Современные научные исследования и инновации. – 2017. – № 5(73). – С. 5.
5. Фурцев, В.И. Грудное вскармливание: состав и свойства грудного молока (сообщение 1) / В. И. Фурцев // Сибирское медицинское обозрение. – 2012. – № 2(74). – С. 91-96.
6. Sanchez C., Franco L., Regal P., Lamas A., Cepeda A., Fente C. Breast Milk: A Source of Functional Compounds with Potential Application in Nutrition and Therapy // *Nutrients* 2021, 13(3), 1026; <https://doi.org/10.3390/nu13031026>.
7. Макарова, Е.Г. Олигосахариды грудного молока: история открытия, структура и защитные функции / Е.Г. Макарова, О.К. Нетребко, С.Е. Украинцев // Педиатрия. Журнал им. Г. Н. Сперанского. 2018. №4. С.152-160.
8. Newburg, D.S.; Ruiz-Palacios, G.M.; Morrow, A.L. Human milk glycans protect infants against enteric pathogens. *Annu. Rev. Nutr.* 2005, 25, 37–58. doi: 10.1146/annurev.nutr.25.050304.092553.
9. Программа оптимизации вскармливания детей первого года жизни в Российской Федерации: методические рекомендации / ФГАУ «НМИЦ здоровья детей» Минздрава России. – М.: б. и., 2019. – 112с.
10. Ванденплас, И. Пребиотики в детских молочных смесях // И. Ванденплас, И.Н. Захарова., Ю.А. Дмитриева // Вопросы современной педиатрии. – 2015. – №1. – С.31-37.
11. Osborn D.A., Sinn JKH. Prebiotics in infants for prevention of allergic disease and food hypersensitivity. *Cochrane Database of Systematic Reviews* 2007, Issue 4. Art. No.: CD006474. doi: 10.1002/14651858.CD006474.pub2.

12. U.S. Food and Drug Administration. Questions and Answers on Dietary Fiber. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.fda.gov/food/food-labeling-nutrition/questions-and-answers-dietary-fiber>.

13. Шубина, О.Г. Полидекстроза – многофункциональный углевод для создания низкокалорийных и обогащенных продуктов / О. Г. Шубина // Пищевая промышленность. – 2005. – №5. – С. 28-31.

14. U.S. Food and Drug Administration. Key nutrients and your family's health [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.fda.gov/media/135619/download#:~:text=The%20Daily%20Value%20for%20dietary,years%20of%20age%20and%20older.>

15. Pärty A, Luoto R, Kalliomäki M, Salminen S, Isolauri E. Effects of early prebiotic and probiotic supplementation on development of gut microbiota and fussing and crying in preterm infants: a randomized, double-blind, placebo-controlled trial. *J Pediatr*. 2013 Nov;163(5):1272-7.e1-2. doi: 10.1016/j.jpeds.2013.05.035.

16. Ziegler E, Vanderhoof JA, Petschow B, Mitmesser SH, Stolz SI, Harris CL, Berseth CL. Term infants fed formula supplemented with selected blends of prebiotics grow normally and have soft stools similar to those reported for breast-fed infants. *J Pediatr Gastroenterol Nutr*. 2007 Mar;44(3):359-64. doi: 10.1097/MPG.0b013e31802fca8c

17. Ashley C., Johnston W.H., Harris C.L. et al. Growth and tolerance of infants fed formula supplemented with polydextrose (PDX) and/or galactooligosaccharides (GOS): double-blind, randomized, controlled trial. *Nutr J* 11, 38 (2012). doi 10.1186/1475-2891-11-38.

18. Scalabrin DM, Mitmesser SH, Welling GW, Harris CL, Marunycz JD, Walker DC, Bos NA, Tölkö S, Salminen S, Vanderhoof JA. New prebiotic blend of polydextrose and galacto-oligosaccharides has a bifidogenic effect in young infants. *J Pediatr Gastroenterol Nutr*. 2012 Mar;54(3):343-52. doi: 10.1097/MPG.0b013e318237ed95.

19. Ribeiro TC, Costa-Ribeiro H Jr, Almeida PS, Pontes MV, Leite ME, Filadelfo LR, Khoury JC, Bean JA, Mitmesser SH, Vanderhoof JA, Scalabrin DM. Stool pattern changes in toddlers consuming a follow-on formula supplemented with polydextrose and galactooligosaccharides. *J Pediatr Gastroenterol Nutr*. 2012 Feb;54(2):288-90. doi: 10.1097/MPG.0b013e31823a8a4c.

20. Flood MT, Auerbach MH, Craig SA. A review of the clinical toleration studies of polydextrose in food. *Food Chem Toxicol*. 2004 Sep;42(9):1531-42. doi: 10.1016/j.fct.2004.04.015.

21. EFSA Panel on Food Additives and Flavourings (FAF), Younes M, Aquilina G, Castle L, Engel KH, Fowler P, Fürst P, Gürtler R, Gundert Remy U, Husøy T, Manco M, Mennes W, Moldeus P, Passamonti S, Shah R, Waalkens-Berendsen DH, Wölffe D, Wright M, Boon P, Crebelli R, Domenico AD, Filipič M, Mortensen A, Woutersen R, Loveren HV, Giarola A, Lodi F, Rincon AM, Tard A, Fernandez MJF. Re-evaluation of polydextrose (E 1200) as a food additive. *EFSA J*. 2021 Jan 8;19(1):e06363. doi: 10.2903/j.efsa.2021.6363.

22. Патент № 2415674 С2 Российская Федерация, МПК А61К 31/715, А23L 1/308, А23С 9/152. Применение полидекстрозы для приготовления молочных смесей для детей на искусственном вскармливании: № 2007144333/15 : заявл. 23.03.2006 : опубл. 10.04.2011 / Б. В. Петскоу, Р. Д. Мкмахон, Г. Р. Гибсон [и др.] ; заявитель МИД ДЖОНСОН НУТРИШЕН КОМПАНИ. – EDN ZKUNCH.

23. Патент № RU2010128535А Российская Федерация МПК А23L 1/308 Педиатрическая смесь пищевых волокон: № 2010128535/13; заявл. 10.12.2008; опубл. 20.01.2012 / А.К. Гудхарт (NL), М.С. Аллес (NL), К.М.И. Ван Ларе (NL), заявитель Н.В. НЮТРИСИА (NL).

24. Патент № 2415674 С2 Российская Федерация, МПК А61К 31/715, А23L 1/308, А23С 9/152. Применение полидекстрозы для приготовления молочных смесей для детей на искусственном вскармливании: № 2007144333/15 : заявл. 23.03.2006; опубл. 10.04.2011 / Б. В. Петскоу, Р. Д. Мкмахон, Г. Р. Гибсон [и др.] ; заявитель МИД ДЖОНСОН НУТРИШЕН КОМПАНИ. – EDN ZKUNCH.

25. Патент № RU2424736С2 Российская Федерация, МПК А23L 1/29, А23L 1/308, А61К 31/702, А23С 9/20, А61Р 1/12 Композиция для лечения и/или профилактики аллергии, астмы, инфекции и атопического дерматита у детей, рожденных посредством кесарева сечения (варианты): № 2008119992/13; заявл. 06.10.2006; опубл. 27.07.2011 / И.

ШМИТТ (DE), Б. ШТАЛЬ (DE), Я. КНОЛ (NL); заявитель Н.В. НЮТРИСИА (NL).

*Статья поступила в редакцию 12.08.2022*

*Статья принята к публикации 16.09.2022*

УДК 615.35

DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0017

## ХАРАКТЕРИСТИКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АНТИМИКРОБНОЙ АКТИВНОСТИ ПЕПТИДНОЙ ФРАКЦИИ ТРИПСИНОВОГО ГИДРОЛИЗАТА МОЛОЗИВА КОРОВ

© Автор(ы) 2022

SPIN: 1303-8180

AuthorID: 651907

ORCID: 0000-0001-5841-1791

Researcher ID: S-2679-2016

ScopusID: 57193134194

**ТИХОНОВ Сергей Леонидович**, доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой пищевой инженерии  
*Уральский государственный экономический университет*  
(620144, Россия, Екатеринбург, улица 8 марта, 62, e-mail: tihonov75@bk.ru)

SPIN: 1403-4418

AuthorID: 168466

ORCID: 0000-0001-6841-1197

ScopusID: 0000-0003-0078-7651

**ДАНИЛОВА Ирина Георгиевна**, доктор биологических наук, доцент,  
заведующий лабораторией морфологии и биохимии

*Институт иммунологии и физиологии Уральского отделения Российской академии наук*  
(620049, Россия, Екатеринбург, улица Первомайская, 106, e-mail: ig-danilova@yandex.ru)

SPIN: 1403-4418

AuthorID: 168466

ORCID: 0000-0001-5841-1791

ResearcherID: A-7952-2015

ScopusID: 57220344666

**ТИХОНОВА Наталья Валерьевна**, доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры пищевой инженерии  
*Уральский государственный экономический университет*  
(620144, Россия, Екатеринбург, улица 8 марта, 62, e-mail: tihonov75@bk.ru)

SPIN: 8938-8644

AuthorID: 1144474

ORCID: 0000-0002-4229-2174

**ТИХОНОВА Мария Сергеевна**, студент факультета педиатрии  
*Уральский государственный медицинский университет*

(620028, Россия, Екатеринбург, улица, улица Ретина, 3 e-mail: tihonov75@bk.ru)

ORCID: 0000-0003-3209-2205

**ПОПОВСКИХ Анжелика Денисовна**, студент

*Уральский государственный экономический университет*  
(620144, Россия, Екатеринбург, улица 8 марта, 62, e-mail: a.d.popovskih@usue.ru)

**Аннотация.** Молозиво коров отличается высоким содержанием макро- и микронутриентов, в частности, пептидов. Цель исследования заключалась в выделении и характеристике пептидов из осадка трипсинового гидролизата молозива коров с оценкой противомикробной активности. При изучении физико-химических свойств трипсинового гидролизата определяли химический состав (массовая доля сухих веществ, массовая доля белка, лактозы, жира и золы) и титриметрическую кислотность и плотность. Фракционный состав гидролизата исследовали на МАЛДИ-ТОФ масс-спектрометре, расшифровку проводили с помощью базы данных *Mascot*. Антимикробные свойства осадка трипсинового гидролизата молозива определяли диско-диффузионным способом на грамположительных *Escherichia coli* и грамотрицательных бактериях *Bacillus subtilis*. Химический состав осадка трипсинового гидролизата молозива коров характеризуется высоким содержанием белка и минеральных веществ. В осадке гидролизата выделены и идентифицированы три пептида T1.1, T1.2, T (1), определена их аминокислотная последовательность, молекулярная масса и концентрация в гидролизате. На основании анализа литературных данных и собственных исследований можно предположить, что пептид T1.2 имеет наибольшую антимикробную активность, но для подтверждения гипотезы необходимо изучить отдельно его противомикробную активность и каждого выделенного пептида. Для воплощения новых результатов в практическое или коммерческое применение необходимо учитывать отсутствие корреляции результатов *in vitro* с функциями пептидов *in vivo* из-за их низкой биодоступности. После приема внутрь пептиды должны противостоять действию пищеварительных ферментов во время их прохождения через желудочно-кишечный тракт и проникать через эпителиальный барьер кишечника, чтобы достичь органов-мишеней в неповрежденной

и активной форме. Следовательно, для лучшего понимания физиологических эффектов пищевых биоактивных пептидов *in vivo* необходимы обширные исследования их стабильности и транспорта в желудочно-кишечном тракте.

**Ключевые слова:** молозиво коров, ферментативный гидролизат, пептиды, антимикробная активность, цитотоксичность, молекулярная масса.

## CHARACTERISTICS AND STUDY OF THE ANTIMICROBIAL ACTIVITY OF THE PEPTIDE FRACTION OF THE TRYPsin HYDROLYZATE OF COW COLOSTRUM

© The Authors 2022

**TIKHONOV Sergei Leonidovich**, doctor of Technology, professor, head of the Department of Food Engineering

*Ural State University of Economics*

*(620144, Yekaterinburg, 8 Marta Street, 62, e-mail: tihonov75@bk.ru)*

**DANILOVA Irina Georgievna**, doctor of Biology, docent, head of the Laboratory of Morphology and Biochemistry

*Institute of Immunology and Physiology, Russian Academy of Sciences*

*(620049, Yekaterinburg, Pervomajskaya, 106, e-mail: ig-danilova@yandex.ru)*

**TIKHONOVA Natalia Valerievna**, doctor of Technology, professor,

professor of the Department of Food Engineering

*Ural State University of Economics*

*(620144, Yekaterinburg, 8 Marta Street, 62, e-mail: tihonov75@bk.ru)*

**TIKHONOVA Maria Sergeevna**, student of the Faculty of Pediatrics

*Ural State Medical University*

*(3 Repin Street, Yekaterinburg, 620028, Russia, e-mail: tihonov75@bk.ru)*

**POPOVSKIH Anzhelika Denisovna**, student,

*Ural State University of Economics*

*(620144, Yekaterinburg, 8 Marta Street, 62, e-mail: a.d.popovskih@usue.ru)*

**Abstract.** The purpose of the study is to isolate and characterize peptides from the sediment of trypsin hydrolyzate of cow colostrum with an assessment of antimicrobial activity. When studying the physicochemical properties of trypsin hydrolyzate, the chemical composition and titrimetric acidity and density were determined. The fractional composition of the hydrolyzate was studied on a MALDI-TOF mass spectrometer; interpretation was performed using the *Mascot* database. Antimicrobial properties of the trypsin hydrolyzate precipitate of colostrum were determined by the disco-diffusion method on gram-positive *Escherichia coli* and Gram-negative bacteria *Bacillus subtilis*. As a result of the research, the chemical composition of the sediment of trypsin hydrolyzate of colostrum of cows was established, which is characterized by a high content of protein:  $13.81 \pm 0.09$  T and minerals. In the precipitate of the hydrolyzate, three peptides were isolated and identified with the determination of the amino acid sequence, molecular weight, and concentration in the hydrolyzate: the largest molecular weight of the peptide is 22 kDa. The precipitate of trypsin hydrolyzate of cow colostrum exhibits antimicrobial activity against gram-positive bacteria *E. coli* ATCC 25922 and gram-negative *Bacillus subtilis*. The results obtained indicate the prospects of biotechnologies based on trypsin hydrolyzate of colostrum of cows.

**Keywords:** cow colostrum, enzymatic hydrolyzate, peptides, antimicrobial activity, cytotoxicity, molecular weight.

**Для цитирования:** Тихонов С.Л. Характеристика и исследование антимикробной активности пептидной фракции трипсинового гидролизата молозива коров / С. Л. Тихонов, И.Г. Данилова, Н.В. Тихонова, М.С. Тихонова, А.Д. Поповских // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022. – Т. 11. – № 3(59). – С. 116-121. – DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0017.

**Введение.** Молозиво коров – сложная биологическая жидкость, содержащая антимикробные пептиды, иммунорегулирующие соединения и факторы роста. Молозиво является потенциальным профилактическим и терапевтическим средством для лечения различных желудочно-кишечных заболеваний. Доклиническими и клиническими исследованиями, проведенными авторами [1], как *in vitro*, так и *in vivo* на людях и животных доказана эффективность применения добавок из молозива коров при желудочно-кишечных заболеваниях. Несмотря на обнадеживающие результаты, необходимы дальнейшие хорошо продуманные исследования, чтобы подтвердить эти эффекты, дозу и

продолжительность лечения. Молозиво безопасно, поскольку нет противопоказаний в отношении высоких доз. В ближайшем будущем добавки на основе молозива могут играть важную роль в профилактике и лечении различных желудочно-кишечных расстройств [1].

Наличие факторов роста, иммуноглобулинов, пептидов, цитокинов, лактоферрина и гормонов позволяет предположить, что молозиво может улучшить функционирование пищеварительной, иммунной и нейроэндокринной систем, а также физическую работоспособность [2].

Можно предположить, что одним из действующих начал молозива являются биологически активные

пептиды, участвующие в межбелковых взаимодействиях, происходящих в клетках. Пептиды вызывают значительный интерес благодаря своим уникальным свойствам и большим перспективам в области инновационной биотерапии. Пептидные «лекарства» изначально играли только роль гормональных аналогов для устранения нарушений гомеостаза. В настоящее время они решают многочисленные биомедицинские задачи, путем проникновения через мембраны клеток [3].

Биоактивные пептиды, полученные из пищевых белков, признаны ценными ингредиентами функциональных продуктов питания и/или нутрицевтиков для укрепления здоровья и снижения риска хронических заболеваний [4].

Для получения пептидов предварительного проводят гидролиз сырья, содержащего белок, с использованием протеолитических ферментов и ферментных препаратов, в частности, ферменты бактериального происхождения, включая алкалазу [5], животного происхождения, включая трипсин [6], растительного происхождения папаин [7].

**Методология.** Цель исследования – выделение и характеристика пептидов из осадка трипсинового гидролизата молозива коров с оценкой противомикробной активности.

Трипсиновый гидролизат молозива коров получен нами по следующей технологии: удаление жировой фракции центрифугированием при 3900 об/мин в течение 7 минут на центрифуге СМ-12-06 (TAGLER, Россия); введение фермента трипсина (Самсон-Мед, Россия) (0,15% от массы молозива) на приготовленном нами фосфатно-буферном растворе (динатрий гидрофосфат додекагидрата (Росполимер, Россия)) при  $pH$  7,4; гидролиз в течение 12 часов при температуре 36°C; повышение температуры до 75°C для инактивации фермента.

Для эксперимента использовали надосадочную жидкость трипсинового гидролизата молозива коров, выделенную методом центрифугирования при 3900 об/мин в течение 7 минут на центрифуге СМ-12-06 (TAGLER, Россия).

При изучении физико-химических свойств трипсинового гидролизата определяли химический состав (массовая доля сухих веществ, массовая доля белка, лактозы, жира и золы), титруемую кислотность и плотность.

Массовую долю сухих веществ определяли по ГОСТ Р 54668-2011, содержание белка – методом Кьельдаля по ГОСТ 25179-2014, лактозы – по ГОСТ 34304-2017, массовую долю жира – по ГОСТ 5867-90, массовую долю золы – по ГОСТ 51463-99, плотность гидролизата – по ГОСТ Р 54758-2011, кислотность – титриметрическим методом по ГОСТ 3624-92.

На первом этапе изучения фракционного состава гидролизата выделяли надосадочную жидкость и осадок путем центрифугирования при 3900 об/мин в течение 10 минут на центрифуге СМ-12-06 (TAGLER, Россия). Для исследований использовали

полученный осадок, который разделяли методом препаративной хроматографии на силикагеле КСКГ, фосфатно-солевой буфер и этанол в изократическом соотношении 9:1 соответственно. Предварительно осадок гидролизата растворяли в 10% гидроокиси натрия, затем исследовали на MALDI-временном масс-спектрометре Ultraflex (Bruker, Германия), расшифровку проводили с помощью базы данных Mascot.

Антимикробные свойства осадка трипсинового гидролизата молозива определяли диско-диффузионным способом на грамположительных *Escherichia coli* и грамотрицательных бактериях *Bacillus subtilis*.

Штаммы бактерий культивировали на плотной питательной среде LB (агар – 1,5%, триптон – 1%, дрожжевой экстракт – 0,5%, NaCl – 1%) и жидкой питательной среде LB (триптон – 1%, дрожжевой экстракт – 0,5%, NaCl – 1%) при температуре 37°C.

Диско-диффузионный метод определения антимикробной активности гидролизатов заключался в следующем. Тест-штамм высевали на агаризованную питательную среду газонем, и одновременно на газон помещали гидролизат. В качестве контроля использовался бумажный диск с питательной средой, в качестве препарата сравнения – диск с антибиотиком «Канамидин» (из стандартного набора). Чашки Петри инкубировали при температуре, соответствующей оптимальной температуре роста каждого тест-штамма микроорганизма, в течение 24±0,5 ч. Результаты учитывались по наличию и размеру (в мм) прозрачной зоны отсутствия роста микроорганизмов вокруг диска.

**Результаты.** В таблице 1 представлены физико-химические показатели трипсинового гидролизата молозива коров.

Таблица 1 – Физико-химические показатели трипсинового гидролизата молозива коров

Наименование показателей	Содержание
Массовая доля белка, %	13,18±0,09
Массовая доля жира, %	0,15±0,01
Массовая доля золы, %	9,50±0,02
Массовая доля сухих веществ, %	24,17±0,42
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,05±0,03
Кислотность, °Т	4,78±0,12

Трипсиновый гидролизат молозива коров характеризуется высоким содержанием белка (13,8%) и золы (9,5%), что свидетельствует, о возможности его использования в качестве источника белка и минеральных веществ при условии доказательства его токсикологической и микробиологической безопасности. Полученные данные согласуются с исследованиями [8], который утверждает, что молозиво содержит до 19% белковых соединений, представленных иммуноглобулинами G (IgG), A (IgA), M (IgM) и пептидами. Высокое содержание макро- и микроэлементов, биоактивных пептидов и факторов роста в гидролизатах молозива коров отмечено в исследованиях [9]. Низкое содержание

жира в гидролизате обусловлено его удалением перед гидролизом. В таблице 2 представлена аминокислотная последовательность пептидных фракций, молекулярная масса и концентрация в осадке трипсинового гидролизата молозива коров.

На рисунках 1 и 2 представлены хроматограммы полученных фракций Т1, Т. После разделения выделены фракции: Т1.1, Т1.2, Т(1).

На рисунках 3-5 представлен масс-спектр образцов пептидных фракций Т1.1., Т1.2 и Т(1).

Таблица 2 – Аминокислотная последовательность пептидных фракций, молекулярная масса и концентрация в осадке трипсинового гидролизата молозива коров

Номер образца	Аминокислотная последовательность	Молекулярная масса, кДа	Концентрация пептида, мг/мл
T1.1	SQ KKKN CP NGTRIRVPGP GP	16	1,95
T1.2	STKRHR M HAC SWR GP LKALSNPRAE FRR	22	1,60
T(1)	IK GS K EKLRLGL KSKSF VR LFG_DLL QMGL	15	1,94

Примечание: А – аланин, G – глицин, V – валин, L – лейцин, I – изолейцин, D – аспарагиновая кислота, E – глутаминовая кислота, S – серин, T – треонин, C – цистеин, M – метионин, R – аргинин, K – лизин, H – гистидин, P – пролин, F – фенилаланин, W – триптофан, N – аспарагин, Q – глутамин

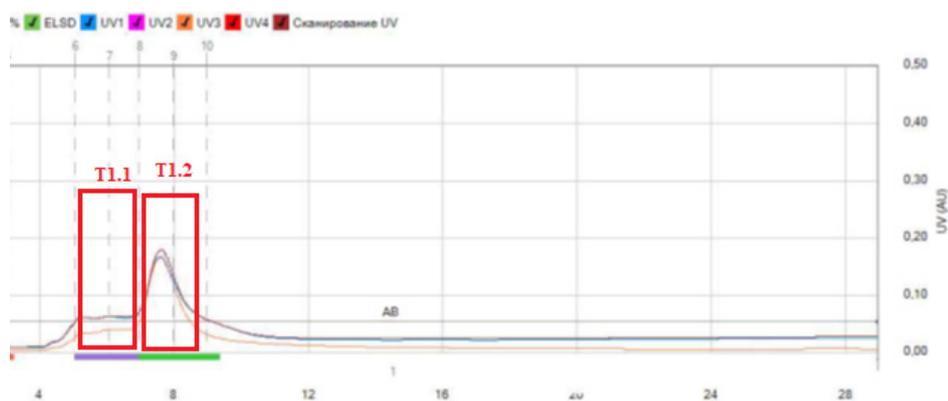


Рисунок 1 – Хроматограмма фракции T1

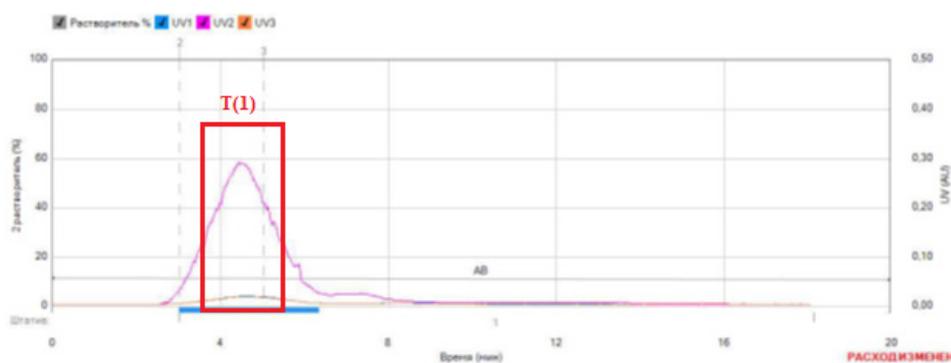


Рисунок 2 – Хроматограмма образца пептидной фракции T

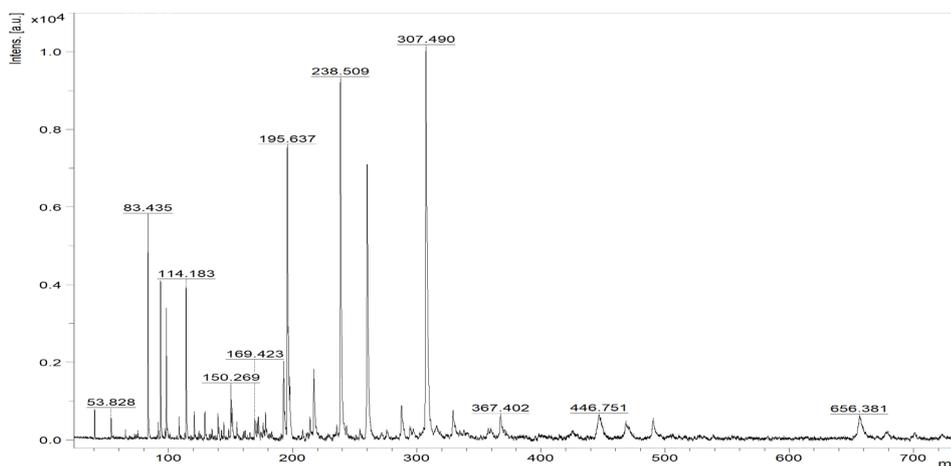


Рисунок 3 – Масс-спектр образца пептидной фракции T1.1

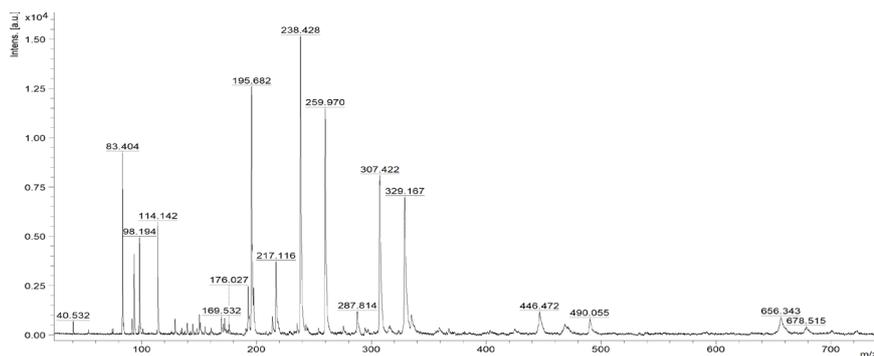


Рисунок 4 – Масс-спектр образца пептидной фракции T1.2

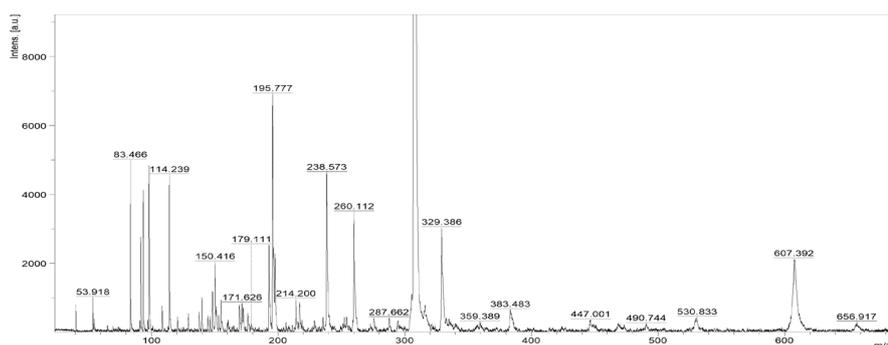


Рисунок 5 – Масс-спектр образца пептидной фракции T(1)

**Обсуждение.** Установлено, что пептид T.1.1 образован двадцатью аминокислотами, среди которых установлены серин, глутамин, лизин, аспарагин, цистеин, пролин, глицин, треонин, аргинин, изолейцин, валин и идентифицирован по базе данных *Protein NCBI* как полипептид «*POSSUM 01-POS SUM-C-EMBRYO-2KB, Trichosurus Vulpecula*» функции которого не изучены.

Пептид T1.2 состоит из 28 аминокислот и является пептидом «*BAMA, Bos taurus*», отличается большей молекулярной массой 22 кДа, в сравнении с другими выделенными пептидами T1.1 – 16 кДа и T (1) – 15 кДа.

Пептид T1.2 согласно исследованиям [10-12] способен проникать через мембрану клетки.

Такие проникающие в клетки пептиды (CPPs) представляют собой группу мембраноактивных пептидов, которые в основном функционируют как переносчики грузов, хотя они также могут проявлять противовирусную активность, в частности, АМФ (ангиотензинпревращающий фермент) мелиттин и CPP (синтетический антимикробный пептид пексиганан), пептид, проникающий в клетки – *pVEC* [13-15].

Пептид T (1) состоит из 28 аминокислот и идентифицируется как пептид «*DG9-ovary Canis familiaris*» роль которого в организме человека не изучена. Проведены исследования по изучению антимикробных свойств осадка трипсинового гидролизата молока коров.

В таблице 3 представлены результаты исследований противомикробной активности осадка трипсинового гидролизата молока коров в отношении *Escherichia coli* и *Bacillus subtilis*.

Таблица 3 – результаты исследований противомикробной активности осадка трипсинового гидролизата молока коров в отношении *Escherichia coli* и *Bacillus subtilis*

Наименование образца	Диаметр зоны лизиса, мм	
	<i>E. coli</i> ATCC 25922	<i>Bacillus subtilis</i>
Осадок трипсинового гидролизата молока коров	16	15
Контроль	0	0
Антибиотик «Канамидин»	25	26

Полученные данные свидетельствуют, что осадок трипсинового гидролизата молока коров проявляет противомикробную активность в отношении грамположительной бактерии *E. coli* ATCC 25922 и грамотрицательной *B. subtilis*, но в меньшей степени, чем известный антибиотик «Канамидин». Так диаметр зоны лизиса бактерии *Escherichia coli* при воздействии осадка трипсинового гидролизата молока коров составил 16 мм, при использовании диска с антибиотиком «Канамидин» – 25 мм. Диаметр зоны лизиса *Bacillus subtilis* при действии гидролизата был на уровне 15 мм, «Канамидина» – 26 мм.

Таким образом, осадок трипсинового гидролизата молока коров, возможно благодаря наличию в нем пептидов проявляет выраженную антимикробную активность в отношении грамположительных и грамотрицательных бактерий. Полученные данные согласуются с исследованиями [16-18], которые утверждают, что антимикробные можно рассматривать в качестве потенциальных альтернатив для лечения инфекций.

Согласно данным [19-20] антимикробные пептиды нацелены на целостность мембраны микроорганизма, что приводит к гибели клеток в результате лизиса. Антимикробные пептиды, содер-

жашие триптофан, либо пролин, могут убивать микроорганизмы, воздействуя на внутриклеточные пути, и поэтому являются многообещающим источником антибиотиков следующего поколения. Для высокой антимикробной активности пептидов с триптофаном требуется минимальная длина из шести аминокислот, и положение этих остатков также влияет на их антимикробную активность. Ароматическая боковая цепь триптофана способна быстро образовывать водородные связи с компонентами мембранного бислоя. Богатые пролином усилители взаимодействуют с рибосомой 70S и нарушают синтез белка. По результатам наших исследований выделенный пептид T1.2 состоит из 28 аминокислот, имеет в составе и триптофан и пролин. Пептиды, содержащие триптофан и/или пролин обладают бактерицидным действием [19], соответственно, этот пептид возможно обуславливает антимикробную активность гидролизата.

**Выводы.** В результате исследований установлен химический состав осадка трипсинового гидролизата молозива коров, который характеризуется высоким содержанием белка и минеральных веществ. В осадке гидролизата выделены и идентифицированы три пептида, определена их аминокислотная последовательность, молекулярной массы и концентрация в гидролизате. На основании имеющихся баз данных функции выделенных пептидов не изучены. Из полученных данных по определению антимикробной активности осадка трипсинового гидролизата молозива коров следует, что выделенные пептиды относятся к биологически активным. На основании анализа литературных данных и собственных исследований можно предположить, что пептид T1.2 имеет наибольшую антимикробную активность, но для подтверждения гипотезы необходимо изучить отдельно его противомикробную активность и каждого выделенного пептида. Для воплощения новых результатов в практическое или коммерческое применение необходимо учитывать отсутствие корреляции результатов *in vitro* с функциями пептидов *in vivo* из-за их низкой биодоступности. После приема внутрь пептиды должны противостоять действию пищеварительных ферментов во время их прохождения через желудочно-кишечный тракт и проникать через эпителиальный барьер кишечника, чтобы достичь органов-мишеней в неповрежденной и активной форме. Следовательно, для лучшего понимания физиологических эффектов пищевых биоактивных пептидов *in vivo* необходимы обширные исследования их стабильности и транспорта в желудочно-кишечном тракте.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Menchetti L, Traina G, Tomasello G, Casagrande-Proietti P, Leonardi L, Barbato O, Brecchia G. Potential benefits of colostrum in gastrointestinal diseases // *Front Biosci (Schol Ed)*. – 2016. – Vol.8. – Iss.2. – Pp. 331-351
2. Główna N, Woźniwicz M. Potential use of Colostrum Bovinum supplementation in athletes - A review // *Acta Sci Pol Technol Aliment*. – 2019. – Vol.18. – Iss.2. – Pp. 115-123

3. Apostolopoulos V, Bojarska J, Chai TT, et al. A Global Review on Short Peptides: Frontiers and Perspectives // *Molecules*. – 2021. – Vol.26. – Iss.2. – P. 430

4. Amigo L, Hernández-Ledesma B. Current Evidence on the Bioavailability of Food Bioactive Peptides // *Molecules*. – 2020. – Vol.25. – Iss.19. – P. 4479

5. Je J.-Y., Lee K.-H., Lee M. H., and Ahn C.-B. Antioxidant and antihypertensive protein hydrolysates produced from tuna liver by enzymatic hydrolysis // *Food Research International*. – 2009. – Vol. 42. – Iss.9. – Pp. 1266–1272

6. Ko S.-C., Kim D. and Jeon Y.-J. Protective effect of a novel antioxidative peptide purified from a marine *Chlorella ellipsoidea* protein against free radical-induced oxidative stress // *Food and Chemical Toxicology*. 2012. – Vol. 50. – Iss.7. – Pp. 2294–2302

7. Salamessy J., Reddy N., Kailasapathy K. and Phillips M. Functional and potential therapeutic ACE-inhibitory peptides derived from bromelain hydrolysis of trevally proteins // *Journal of Functional Foods*. – 2015. – Vol. 14. – Pp. 716–725

8. Costa A, Goi A, Penasa M, Nardino G, Posenato L, De Marchi M. Variation of immunoglobulins G, A, and M and bovine serum albumin concentration in Holstein cow colostrum // *Animal*. – 2021. – Vol.17. – Iss.7. – P. 100299.

9. Arslan A, Duman H, Kaplan M, Uzkuç H, Bayraktar A, Ertürk M, Alkan M, Frese SA, Duar RM, Henrick BM, Karav S. Determining Total Protein and Bioactive Protein Concentrations in Bovine Colostrum // *J Vis Exp*. 2021. – Vol. 50. – P. 178.

10. Gatzeva-Topalova P. Z. et al. Structure and flexibility of the complete periplasmic domain of BamA: the protein insertion machine of the outer membrane // *Structure*. – 2010. – Vol. 18. – Iss.11. – Pp. 1492-1501

11. Baker S.L., Sousa M.C., Jansen K.B., et al. Crystal structure of BamB bound to a periplasmic domain fragment of BamA, the central component of the  $\beta$ -barrel assembly machine. *ansen KB, J Biol Chem*. 2015 Jan 23;290(4). – Pp. 2126-36.

12. Heuck A., Schleiffer A., Clausen T., Heuck A. Augmenting  $\beta$ -augmentation: structural basis of how BamB binds BamA and may support folding of outer membrane proteins. *J Mol Biol*. – 2011 Mar 11;406(5). – Pp. 659-667.

13. Jang, A., Jo, C., Kang, K. S., & Lee, M. Antimicrobial and human cancer cell cytotoxic effect of synthetic angiotensin-converting enzyme (ACE) inhibitory peptides // *Food Chemistry*. – 2008. – Vol. 107. Iss.1. – Pp. 327–336

14. Zhang X.L., Jiang A.M., Ma Z.Y., Li X.B., Xiong Y.Y., Dou J.F., Wang J.F., Zhang X.L., et al. The synthetic antimicrobial peptide pexiganan and its nanoparticles (PNPs) exhibit the anti-helicobacter pylori activity in vitro and in vivo. *Molecules*. 2015 Mar 2;20(3). Pp. 3972-3985.

15. Marimuthu S., Nagarajan K., Perumal S., Palanisamy S., Subbiah L. Structural stability of antimicrobial peptides rich in tryptophan, proline and arginine: a computational study. *J Biomol Struct Dyn*. 2022 May. – 40(8). – Pp. 3551-3559. doi: 10.1080/07391102.2020.1848631.

16. Parchebafi A., Tamanaee F., Ehteram H., Ahmad E., Nikzad H., Haddad Kashani H. The dual interaction of antimicrobial peptides on bacteria and cancer cells; mechanism of action and therapeutic strategies of nanostructures. *Microb Cell Fact*. 2022 Jun 18;21(1). – Pp. 118-127.

17. Gruber K.A., Ji R.L., Gallazzi F., Jiang S., Van Doren S.R., Tao Y.X., Newton Northup J., Gruber K.A. et al. Development of a Therapeutic Peptide for Cachexia Suggests a Platform Approach for Drug-like Peptides. *ACS Pharmacol Transl Sci*. 2022 Apr 14;5(5). – Pp. 344-361. doi: 10.1021/acspsci.1c00270.

18. Zuo S., Wang B., Zhang K., Wang Y., Li X. et al. Antimicrobial Mechanisms and Clinical Application Prospects of Antimicrobial Peptides. *Molecules*. – 2022 Apr 21;27(9). – Pp. 2675-2684.

19. Mishra A.K, Choi J, Moon E, Baek KH. Tryptophan-Rich and Proline-Rich Antimicrobial Peptides // *Molecules*. – 2018. – Vol.23. – Iss.4. – P. 815.

20. Li T., Yang N., Teng D., Mao R., Hao Y., Wang X., Wang J. C-terminal mini-PEGylation of a marine peptide N6 had potent antibacterial and anti-inflammatory properties against *Escherichia coli* and *Salmonella* strains in vitro and in vivo. *BMC Microbiol*. – 2022 May 12;22(1). – Pp. 128-139.

Статья поступила в редакцию 12.07.2022

Статья принята к публикации 16.09.2022

УДК: 664:612.393.1

DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0018

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ ЭКСТРАКЦИОННОГО АППАРАТА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЛИНИИ ПО ПРОИЗВОДСТВУ ВИСКИ

© Автор(ы) 2022

SPIN: 5147-2676

AuthorID: 279181

ORCID: 0000-0003-3035-0354

ResearcherID: F-1784-2014

ScopusID: 57190973304

**БОРОДУЛИН Дмитрий Михайлович**, доктор технических наук,

директор Института инженерных технологий

*Кемеровский государственный университет*

*(650000, Россия, Кемерово, улица Красная, дом 6, e-mail: borodulin\_dmitri@list.ru)*

SPIN: 6276-9754

AuthorID: 430602

ORCID: 0000-0002-9503-1349

ResearcherID: AEM-0268-2022

ScopusID: 57217050130

**САФОНОВА Елена Александровна**, кандидат технических наук, доцент кафедры Инженерного дизайна

*Кемеровский государственный университет*

*(650000, Россия, Кемерово, улица Красная, дом 6, e-mail: safonova.kem@yandex.ru)*

SPIN: 6149-6300

AuthorID: 796839

ORCID: 0000-0002-4615-5628

ResearcherID: AAB-8546-2022

ScopusID: 57218105822

**ПРОСИН Максим Валерьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры Техносферной безопасности

*Кемеровский государственный университет*

*(650000, Россия, Кемерово, улица Красная, дом 6, e-mail: prosinmv@yandex.ru)*

SPIN: 8256-5779

AuthorID: 1059896

ORCID: 0000-0002-6521-9308

ScopusID: 57219225693

**ГОЛОВАЧЕВА Яна Сергеевна**, аспирант кафедры Инженерного дизайна

*Кемеровский государственный университет*

*(650000, Россия, Кемерово, улица Красная, дом 6, e-mail: iitumr@yandex.ru)*

**Аннотация.** Оснащение технологических линий новым, более эффективным оборудованием и внедрение современных технологий является актуальной задачей перед российскими производителями виски. При классической технологии выдержка висковых дистиллятов происходит в дубовых бочках и является длительным процессом. Бочки проходят предварительную подготовку, что приводит к повышению их стоимости, и как следствие самого виски. Целью данной работы являлась оценка эффективности работы новой конструкции экстракционного аппарата на предприятии ООО «БирЛайн» для осуществления процесса созревания висковых дистиллятов с добавлением в него дубовой щепы при воздействии на них кислородом. Для этого была разработана технологическая линия, включающая в себя экстракционный аппарат новой конструкции. Его особенностью является наличие рецикл-каналов. Интенсификация процесса созревания вискового дистиллята с добавлением в него дубовой щепы в данном аппарате происходит за счет ввода в нижнюю часть экстрактора воздушной смеси, обогащенной кислородом, в газораспределительное устройство. В результате этого происходит хаотичное движение твердой фазы по всему объему аппарата и таким образом щепы переходит в псевдооживленное состояние. Кислород, прошедший через весь объем жидкой фазы и затем через рецикл-каналы, вновь попадает в газораспределительное устройство. Это приводит к более интенсивному перемешиванию дубовой щепы и снижению расхода кислорода. В представленном экстракторе был исследован процесс созревания висковых дистиллятов с концентрацией спирта  $C_c = 42\%$  при их насыщении газом с концентрацией кислорода  $90\%$  ежедневно в течении 3 минут под давлением  $0,8$  ат. в течение 3 месяцев. В результате длительность данного процесса сокращается в три раза, по сравнению с классическим способом, предусматривающим созревание вискового дистиллята в дубовых бочках.

**Ключевые слова:** виски, висковый дистиллят, созревание, дубовая щепы, экстрактор, рецикл-каналы, насыщение кислородом, псевдооживленный слой.

**STUDY OF THE EFFICIENCY OF THE EXTRACTION APPARATUS OF NEW DESIGN IN THE TECHNOLOGICAL LINE FOR THE PRODUCTION OF WHISKEY**

© The Author(s) 2022

**BORODULIN Dmitry Mikhailovich**, doctor of technical sciences,  
director of the Institute of Engineering Technologies**SAFONOVA Elena Aleksandrovna**, candidate of technical sciences,  
associate professor of the department of Engineering design**PROSIN Maksim Valerievich**, candidate of technical sciences,  
associate professor of the department of Technosphere safety**GOLOVACHEVA Yana Sergeevna**, postgraduate student of the department of Engineering design,  
*Kemerovo State University*

(650000, Russia, Kemerovo, Krasnaya street, 6,

*e-mails: borodulin\_dmitri@list.ru, safonova.kem@yandex.ru, prosinmv@yandex.ru, iitumr@yandex.ru*)

**Abstract.** Equipping production lines with new, more efficient equipment and introducing modern technologies is an urgent task for Russian whiskey producers. With the classical technology, whiskey distillates are aged in oak barrels and is a long process. Barrels are pre-treated, which leads to an increase in their cost, and as a result of the whiskey itself. The purpose of this work was to evaluate the efficiency of the new design of the extraction apparatus at the enterprise LLC «BeerLine» for the process of maturation of whiskey distillates with the addition of oak chips to it when exposed to oxygen. For this a technological line which includes an extraction apparatus of a new design is developed. Its feature is the presence of recycling channels. The intensification of the maturation process of whiskey distillate with the addition of oak chips in this apparatus occurs due to the introduction of an oxygen-enriched air mixture into the gas distribution device into the lower part of the extractor. As a result of this, a chaotic movement of the solid phase occurs throughout the entire volume of the apparatus, and thus the chips pass into a fluidized state. Oxygen that has passed through the entire volume of the liquid phase and then through the recycle channels again enters the gas distribution device. This results in more intensive mixing of oak chips and reduced oxygen consumption. In the presented extractor, the process of maturation of whiskey distillates with an alcohol concentration  $C_c = 42\%$  was studied when they were saturated with gas with an oxygen concentration of 90% daily for 3 minutes under a pressure of 0.8 atmospheres for 3 months. As a result, the duration of this process is reduced by three times, compared with the classical method, which involves the maturation of the whisk distillate in oak barrels.

**Keywords:** whisky, whiskey distillate, maturation, oak chips, extractor, recycling channels, oxygenation, fluidized bed.

*Для цитирования:* Бородулин Д.М. Исследование эффективности работы новой конструкции экстракционного аппарата в технологической линии по производству виски / Д.М. Бородулин, Е.А. Сафонова, М.В. Просин, Я.С. Головачева // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022. – Т. 11. – № 3(59). – С. 122-127. – DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0018.

**Введение.** В настоящее время перед российскими производителями виски поставлена проблема оснащения технологических линий новым, более эффективным оборудованием и внедрения современных технологий, интенсифицирующих как отдельные процессы, так и изготовление продукта в целом, не потеряв при этом качество, вкуса и аромата напитка [1-2].

К определяющим факторам, оказывающее влияние на качество напитка, относится сырье и технология. Выдержку висковых дистиллятов по классической технологии проводят в дубовых бочках. Этот процесс является довольно долгим, поскольку занимает несколько лет. Кроме того, предъявляются определенные требования для подготовки бочек, что повышает и их стоимость и, как следствие, готового напитка. В настоящее время имеется ряд исследований, которые показывают ряд преимуществ выдержки висковых дистиллятов с применением дубовой щепы перед бочками [3-6]. Также, для сокращения срока выдержки рассматриваются различные интенсивные технологии с применением

методов воздействия на процесс экстрагирования ультразвуком, микроволнами, озонированием, термической обработкой и др. [7-17], которые требуют современного аппаратного оформления. В результате была сформулирована цель работы, которая заключалась в исследовании эффективности работы новой конструкции экстракционного аппарата в технологической линии по производству виски. Аппарат применялся на этапе созревания висковых дистиллятов с применением дубовой щепы методом воздействия на процесс экстрагирования кислородом.

**Методология.** Для проведения исследования была спроектирована технологическая линия на предприятии ООО «БирЛайн».

Она состояла из заторно-суловарочно-фильтрационного аппарата, дистилляционно-ректификационного аппарата и экстракционного аппарата новой конструкции (рис. 1).

В заторно-суловарочно-фильтрационном аппарате [18] производилось приготовление суслу (рис. 1). В таблице 1 показаны значения его технических характеристик.

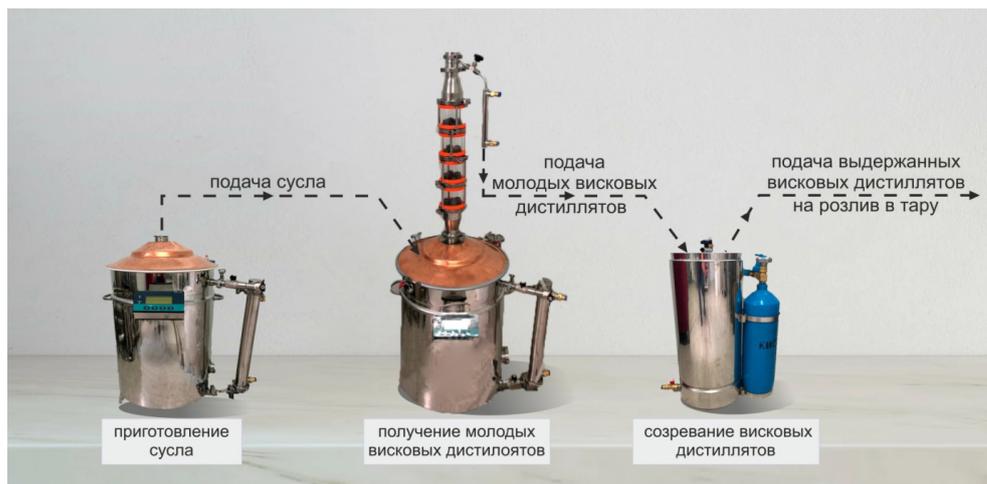


Рисунок 1 – Технологическая линия

Таблица 1 – Заторно-суловарочно-фильтрационный аппарат

Технические характеристики	Значение
Номинальная потребляемая мощность, кВт	3
Номинальное напряжение, В	230
Род тока	переменный
Частота тока, Гц	50
Потребляемая мощность одного тэна, кВт	3
Количество тэнов, шт	1
Номинальный объем котла, л	60
Температура кипения пропиленгликоля, С	187,4
Объем заливаемого пропиленгликоля в рубашку, л	8,5
Основные размеры:	
объем, л	60
высота, мм	750
диаметр, мм	550

Дистилляционно-ректификационный аппарат, в котором были получены молодые висковые дистилляты (рис. 1), имеет аналогичные характеристики, как и заторно-суловарочно-фильтрационный аппарат, так как он является универсальным для осуществления обоих процессов. После получения сусла на крышку аппарата устанавливают ректификационную колонну и конденсатор для проведения процесса перегонки.

Новый экстракционный аппарат, включенный в технологическую линию, является аппаратом периодического действия (рис. 2) и обладает техническими характеристиками, показанными в таблице 2. Технической особенностью экстрактора является наличие рецикл-каналов [19].

Экстрактор состоит из цилиндрического корпуса 1 и перфорированной крышки 2, для перекрытия отверстий которой служит рукоятка 3. На крышке смонтированы манометр 4 и клапан сброса избыточного давления 5. Для подачи вискового дистиллята и дубовой щепы установлен патрубок 6. Выход продукта осуществляется через разгрузочный патрубок 7. На корпусе выполнены два рецикл-канала 8. Патрубок 10 служит для подачи кислорода в газораспределительное устройство 9, расположенное в нижней части экстрактора.

В результате того, что газовая смесь, обогащенная кислородом, вводится в газораспределительное устройство, происходит хаотичное движение твердой

фазы по всему объему аппарата. Таким образом, щепы переходит в псевдоожиженное состояние. При этом дистиллят насыщается кислородом, улучшая органолептические характеристики виски. Кислород, прошедший через весь объем жидкой фазы и затем через рецикл-каналы 8, вновь попадает в газораспределительное устройство. Это приводит к более интенсивному перемешиванию дубовой щепы и снижению расхода кислорода. Через перфорированную крышку 2 из аппарата выводится часть кислорода. По окончании всего процесса созревания вискового дистиллята через патрубок 7 в нижней части цилиндрического корпуса 1 производят отвод насыщенного экстракта, а через крышку 2 удаляют отработанную дубовую щепу. Таким образом, длительность созревания вискового дистиллята в новом аппарате значительно сокращается, по сравнению с классическим способом проведения процесса в дубовых бочках.

Таблица 2 – Экстракционный аппарат

Технические характеристики	Значение
Номинальный объем экстрактора, л	60
Рабочее давление, ат	0,8
Основные размеры:	
высота, мм	560
диаметр, мм	400

В представленном экстракторе исследован процесс созревания висковых дистиллятов с концентрацией спирта 42% при их насыщении газом с концентрацией кислорода 90% ежедневно в течении 3 минут под давлением 0,8 ат. на продолжении 3 месяцев.

Были проконтролированы физико-химические параметры качества полученных висковых дистиллятов. Для их оценки был выполнен хроматографический анализ, который проводился в лаборатории центра стандартизации, метрологии и испытаний «Кузбасский ЦСМ» [20-22], в результате которого были определены массовые концентрации фурфурола, альдегидов, сивушного масла, сложных эфиров. Выдержанный висковый дистиллят также подвергался органолептическому анализу.

**Результаты.** На рисунках 3 и 4 изображены полу-

ченные хроматограммы молодого и выдержанного висковых дистиллятов. На них наблюдаются пики, которые показывают в различные промежутки времени массовые концентрации веществ.

Значения физико-химических показателей качества

полученных висковых дистиллятов в сравнении с регламентированными приведены в таблице 3.

В таблице 4 показаны критерии полученного органолептического анализа выдержанного вискового дистиллята.

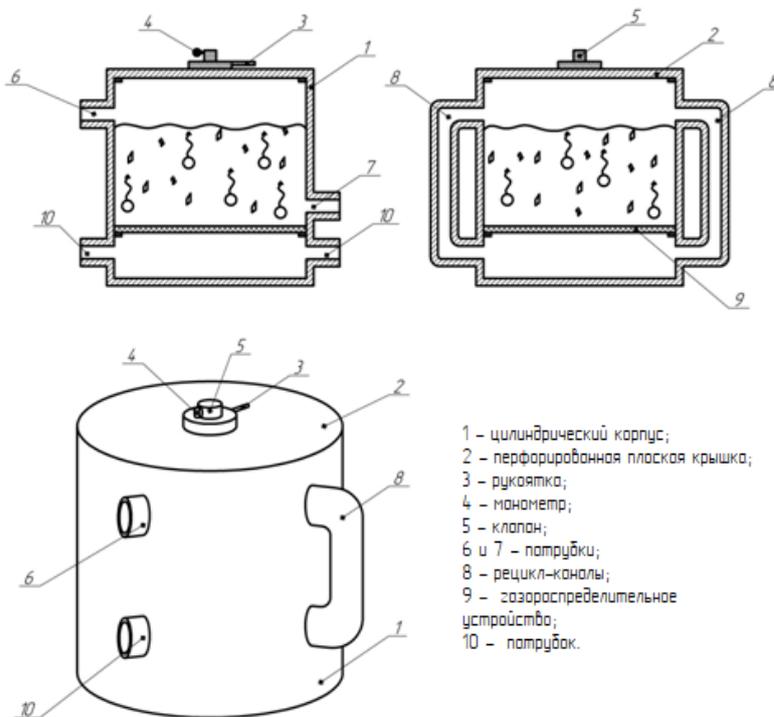


Рисунок 2 – Экстрактор периодического действия для извлечения целевых компонентов с рецикл-каналами

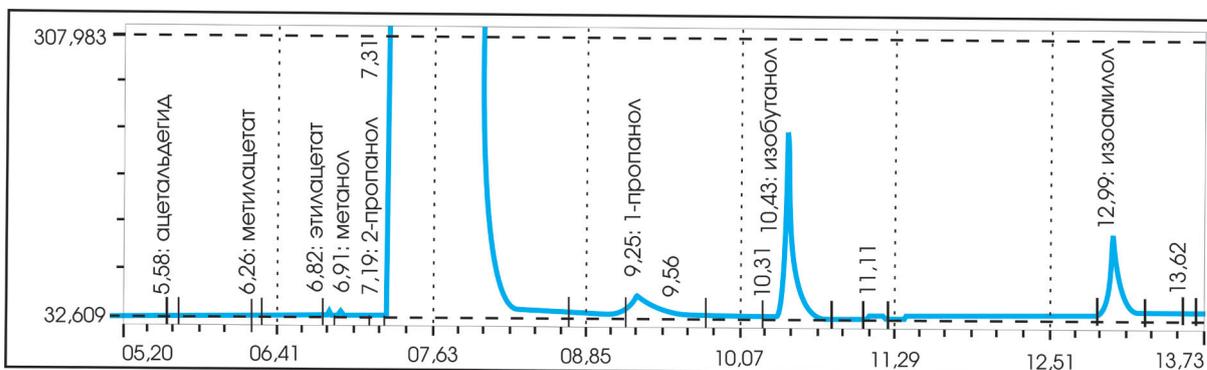


Рисунок 3 – Молодой висковый дистиллят

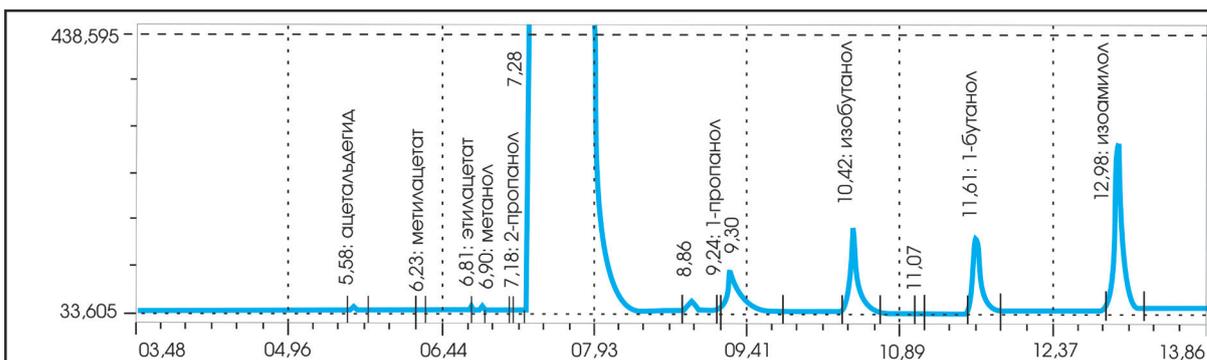


Рисунок 4 – Выдержанный висковый дистиллят

Таблица 3 – Физико-химические показатели качества висковых дистиллятов

Показатель	Значение по ГОСТ 33281	Значения	
		Молодой висковый дистиллят	Выдержанный висковый дистиллят
Крепость, %, об.	40-60	42,1±0,1	42,9±0,1
Массовая концентрация фурфурола в 1 дм <sup>3</sup> безводного спирта, мг	30	не выявлено	Менее 2,7
Массовая концентрация альдегидов в 1 дм <sup>3</sup> безводного спирта, мг	10- 350	1,4± 0,21	62,29 ± 9,34
Массовая концентрация сивушного масла в 1 дм <sup>3</sup> безводного спирта, мг	500-6000	1788± 268,2	3208 ± 481,2
Массовая концентрация сложных эфиров в 1 дм <sup>3</sup> безводного спирта, мг	50 – 1500	11,01 ± 1, 65	46,52 ± 6,98
Объемная доля метилового спирта в пересчете на безводный спирт, %, не более	0,05	0,0053± 0,0008	0,0056± 0,0008

Таблица 4 – Органолептические показатели выдержанного вискового дистиллята

Показатель	Значение	
	По ГОСТ 33281	Факт
Внешний вид	Прозрачный, без посторонних включений и осадка	Прозрачный, без посторонних включений и без осадка
Цвет	От светло-желтого до темно-коричневого	Светло коричневый
Аромат	Сложный с тонами хереса, миндаля, карамели, меда, орехов, полыни, сухофруктов или другими тонами, без постороннего аромата	Сложный, без постороннего аромата
Вкус	Гармоничный, хорошо сбалансированный, сладко-сухой с тонами орехов, карамели, кофе, с оттенком горечи и яблок или другими тонами, без постороннего привкуса	Гармоничный без посторонних привкусов

**Обсуждение.** Из приведенных хроматограмм видно, что в обоих дистиллятах в составе 1 дм<sup>3</sup> безводного спирта имеются фурфурол, альдегиды, сивушные масла. По прошествии 14 минут пиков не наблюдалось. Это означает последующее отсутствие нежелательных веществ в экспериментальных дистиллятах.

Крепость выдержанного вискового дистиллята составила 42%, что соответствует нормам ГОСТ. Фурфурол является веществом, вызывающим отравление человека. Его токсичные свойства оказывают отрицательные действия на нервную систему, кожу и слизистые оболочки. Поэтому, его концентрация строго регулируется. Содержание фурфурола в экспериментальном выдержанном висковом дистилляте определено менее 2,7 мг на 1 дм<sup>3</sup> безводного спирта, вследствие чего можно утверждать, что полученный напиток соответствует высокому качеству. Концентрация альдегидов, сивушных масел и сложных эфиров, метилового спирта в исследуемых дистиллятах не превышают требуемых норм. Таким образом, все значения физико-химических показателей приближены к меньшему пределу нормативных интервалов. По окончании этапа выдержки значения рассматриваемых показателей несущественно увеличивается. Это можно объяснить тем, что вследствие воздействия кислорода на вещества в процессе экстрагирования происходят окислительные реакции, которые в результате положительно влияют на процесс созревания дистиллята. Сложные эфиры обогащают виски фруктовыми ароматами и влияют на их насыщенность [23-25].

Таким образом, можно сделать вывод о том, что полученный висковый дистиллят в новой конструкции экстракционного аппарата при его насыщении 90% кислородом соответствует всем требованиям качества и безопасности.

Анализируя полученные органолептические характеристики качества выдержанного вискового дистиллята из таблицы 4, можно сделать вывод о том, что исследуемый экстракционный аппарат с технологическими параметрами работы (насыщение дистиллята газом с концентрацией кислорода 90% под давлением 0,8 ат. с регулярностью один раз в день в течение 3 мин., концентрация спирта вискового дистиллята 42%), позволяет получить качественный напиток, не имеющий посторонних ароматов и привкусов. Стоит также сказать, что в процессе созревания висковых дистиллятов не добавлялись какие-либо пищевые ингредиенты, оказывающие влияние на его вкусовые и ароматические характеристики.

**Выводы.** Анализ полученных при помощи хроматографии физико-химических характеристик выдержанного вискового дистиллята на ООО «БирЛайн» позволяет сделать вывод о том, что содержание фурфурола в нем определено менее 2,7 мг на 1 дм<sup>3</sup> безводного спирта. Концентрация альдегидов, сивушных масел, сложных эфиров и метилового спирта не превышают норм, требуемых ГОСТ. Это говорит о высоком качестве полученного напитка.

Результаты органолептической оценки вискового выдержанного дистиллята показали, что произведен качественный напиток, в котором отсутствуют посторонние ароматы и привкусы. В процессе созревания висковых дистиллятов не добавлялись какие-либо пищевые ингредиенты, влияющие на данные характеристики.

Новая конструкция экстракционного аппарата доказала свою эффективность в результате успешно пройденных промышленных испытаний на ООО «БирЛайн», г. Кемерово. Таким образом, аппарат рекомендован к применению в технологических линиях по производству виски на этапе созревания

висковых дистиллятов с применением дубовой щепы методом воздействия на процесс экстрагирования кислородом.

Предложенный способ созревания висковых дистиллятов можно с уверенностью считать экономически эффективным, поскольку длительность данного процесса сокращается в три раза, по сравнению с классическим способом, предусматривающим созревание вискового дистиллята в дубовых бочках, и таким образом, производитель имеет возможность увеличить выпуск напитка без дополнительных расходов на необходимые ресурсы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Оганесянц Л.А., Рейтблат Б.Б., Песчанская В.А., Дубинина Е.В. Научные аспекты производства крепких спиртных напитков из плодового сырья // *Виноделие и виноградарство*. – 2012. – № 1. – С. 18-19.
2. Prosin M., Borodulin D., Safonova E., Golovacheva Y. Research of extractors for the extraction of target components from plant materials of various internal structures // *E3S Web of Conferences*, 2021. – V. 273, 01031. – DOI: 10.1051/e3s-conf/202127301031.
3. Луканин А.С., Байлук С.И., Сидоренко А.Н., Зражка С.Г. Выдержка коньячных спиртов в старых дубовых бочках с использованием продуктов переработки древесины дуба // *Магарач. Виноградарство и виноделие*. – 2010. – № 3. – С. 34-36.
4. Новикова И.В. Теоретические и практические аспекты интенсивной технологии спиртных напитков из зернового сырья с применением экстрактов древесины. Москва-Берлин: DirectMEDIA, 2014. – 150 с.
5. Морозова С.С., Абрамова И.М., Головачева Н.Е., Галлямова Л.П., Шубина Н.А., Мартиросян А.С. Перспективный способ обработки древесины дуба для выдержки висковых дистиллятов // *Пищевая промышленность*. – 2019. – № 4. – С. 69-70.
6. Абрамова А.В. Состав древесины дуба и его воздействие на алкогольные напитки при выдержке // *Успехи современной науки*. – 2017. – Том 1. – № 6. – С. 140-142.
7. D.M. Borodulin, Reznichenko I.Yu., Prosin M.V., Shalev A.V. Comparative analysis of extraction methods in distilled drinks production // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Production and Processing of Agricultural Raw Materials*. – 2021. – Vol. 640. – P. 022060. DOI: 10.1088/1755-1315/640/2/022060
8. Новикова И.В., Агафонов Г.В., Шабанов И.Е., Коротких Е.А., Маркин А.А. Интенсификация экстрагирования компонентов из древесины дуба с помощью ультразвука // *Хранение и переработка сельхозсырья*. – 2014. – № 10. – С. 34-37.
9. Бородулин Д.М., Резниченко И.Ю., Просин М.В., Шалев А.В., Потапова М.Н., Головачева Я.С. Исследование совместного влияния сверхвысоко-частотного излучения и кислорода на процесс экстрагирования в технологии получения спиртных напитков // *Пиво и напитки*. – 2020. – № 2. – С. 15-19.
10. Dmitry M. Borodulin, Maksim V. Prosin, Alexey V. Shalev and Yana S. Golovacheva. Influence of Microwave Radiation on Whiskey Distillate Quality Indicators // *Bioscience Biotechnology Research Communications*. – 2021. – Vol 14 – No (4). P. 1701-1713. DOI: <http://dx.doi.org/10.21786/bbrc/14.4.48>
11. Бородулин Д.М., Просин М.В., Потапов А.Н., Шалев А.В. Исследование влияния микроволнового воздействия на процесс созревания висковых дистиллятов // *Хранение и переработка сельхозсырья*. – 2019. – № 4. – С. 141-153. DOI: <https://doi.org/10.36107/spfp.2019.154>
12. Васильев А.В., М.Н. Простак. Термическая обработка коньячных спиртов в процессе выдержки // *Виноградарство и виноделие*. – 2009. – № 1. – С. 35-36.
13. Оганесянц Л.А., В.А. Песчанская, В.П., Осипова Джанаева О.В., Гаджиев М.С., Мишиев П.Я. Влияние термической обработки древесины дуба на ее химический состав и качество коньяков // *Виноделие и виноградарство*. – 2008. – № 5. – С.7.
14. Borodulin D. M., Prosin M. V., Shalev A. V., Golovacheva Y. S. Influence of Microwave Radiation on Whiskey Distillate Quality Indicators // *Biosci.Biotech.Res.Comm.* – 2021. – 14 (4). – pp. 1701-1713 – DOI: <http://dx.doi.org/10.21786/bbrc/14.4.48>
15. Востриков С.В., Новикова И.В. Влияние физико-химических методов обработки водно-спиртовых смесей и дубовой древесины на эффективность получения компонентов виски // *Известия вузов. Пищевая технология*. 2002. № 4. С 26-28.
16. Овсянникова Е.А., Киселева Т.Ф., Потапов А.Н., Дюжев А.В. Исследование процесса экстрагирования дикорастущих ягод Сибири с использованием биокаталитических методов // *Техника и технология пищевых производств*. – 2012. – № 4 (27). – С. 110-114.
17. T. Belwal, F. Chemat, P.R. Venskutonis, G. Cravotto, D. K. Jaiswal, I. D. Bhatt, H. P. Devkota, Z. Luoahi. Recent advances in scaling-up of non-conventional extraction techniques: Learning from successes and failures // *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. – 2020. – Vol. 127. – Article 115895. DOI: [doi.org/10.1016/j.trac.2020.115895](https://doi.org/10.1016/j.trac.2020.115895)
18. Шалев А.В., Бородулин Д.М., Сафонова Е.А., Сидорин К.М., Костина В.В. Заторно-суловарочно-фильтрационный аппарат // Пат. 2713107 С1 Российская Федерация, МПК С12С 13/02, С12С 7/00. Заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО КемГУ. - №2018144334; заявл. 13.12.2018; опубл. 03.02.2020, Бюл. №4. – 8 с.
19. Бородулин Д.М., Шалев А.В., Просин М.В., Вечтомова Е.А., Потураева Н.Л., Демченко К.Э. Экстрактор периодического действия для извлечения целевых компонентов с рецикл-каналами // Пат. 2707219 С1 Российская Федерация, МПК В01Д 11/02. Заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО КемГУ. - №2019109707; заявл. 02.04.2019; опубл. 25.11.2019, Бюл. №33. – 7 с.: ил.
20. Федоренко Б.Н., Бородулин Д.М., Просин М.В., Шафрай А.В., Лобасенко Б.А., Головачева Я.С. Определенные рациональных технологических параметров работы экстрактора Сокслета при получении спиртовой настойки из ягод клюквы // *Техника и технология пищевых производств*. – 2020. – Т. 50, № 1. – С. 115-123. – DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-1-115-123>
21. Dyshlyuk L., Babich O., Belova D., Prosekov A. Comparative analysis of physical and chemical properties of biodegradable edible films of various compositions // *Journal of Food Process Engineering*. – 2017. – Vol. 40, № 1. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpe.12331>
22. Carlsen M.H., Halvorsen B.L., Holte K. The total antioxidant content of more than 3100 foods, beverages, spices, herbs and supplements used worldwide // *Nutrition Journal*. – 2010. – Vol. 9, № 1. DOI: <https://doi.org/10.1186/1475-2891-9-3>
23. Pizarro C., Rodríguez-Tecedor S., Esteban-Díez I., Pérez-del-notario N., González-Sáiz J.M. Experimental design approach to evaluate the impact of oak chips and micro-oxygenation on the volatile profile of red wines // *Food chemistry*, 2014. – № 148, pp. 357-366. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.10.039>
24. Kodama S., Shoda T., Machmudah S., Wahyudiono Enhancing pressurized water extraction of  $\beta$ -glucan from barley grain by adding CO<sub>2</sub> under hydrothermal conditions// *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2015. – V. 97. – pp. 45-54. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2015.08.012>
25. Pradal D., Vauchel P., Decossin S., Dhulster P., Dimitrov K. Integrated extraction-adsorption process for selective recovery of antioxidant phenolics from food industry by-product // *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2018. – V. 127. – pp. 83-92. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2018.03.016>

*Статья поступила в редакцию 01.08.2022*

*Статья принята к публикации 16.09.2022*

УДК: 579.66

DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0019

## ИЗУЧЕНИЕ СПОСОБНОСТИ МОЛОЧНОКИСЛЫХ БАКТЕРИЙ К ФЕРМЕНТАЦИИ РАСТИТЕЛЬНЫХ АНАЛОГОВ МОЛОКА

© Автор(ы) 2022

SPIN: 4510-4135

AuthorID: 1137817

ORCID: 0000-0002-3044-3529

**СЕРАЗЕТДИНОВА Юлия Ренатовна**, магистрант кафедры бионанотехнологии

*Кемеровский государственный университет*

(650000, Россия, Кемерово, Красная 6, e-mail: serazetdinova2000@mail.ru)

SPIN: 5194-7508

AuthorID: 1137837

ORCID: 0000-0003-3988-8521

**ФРОЛОВА Анна Сергеевна**, магистрант кафедры бионанотехнологии

*Кемеровский государственный университет*

(650000, Россия, Кемерово, Красная 6, e-mail: ftyftyftyfty.af@mail.ru)

SPIN: 8227-2844

AuthorID: 542534

ORCID: 0000-0002-3536-562X

ResearcherID: E-2147-2015

ScopusID: 6603279179

**МИЛЕНТЬЕВА Ирина Сергеевна**, доктор технических наук, доцент кафедры бионанотехнологии

*Кемеровский государственный университет*

(650000, Россия, Кемерово, Красная 6, e-mail: irazumnikova@mail.ru)

ORCID: 0000-0003-3485-9123

ResearcherID: AAF-8938-2021

ScopusID: 57041280000

**МИНИНА Варвара Ивановна**, доктор биологических наук, профессор,

заведующий кафедрой генетики и фундаментальной медицины

*Кемеровский государственный университет*

(650000, Россия, Кемерово, Красная 6, e-mail: vminina@mail.ru)

**Аннотация.** В работе изучают способность молочнокислых микроорганизмов к ферментации растительных аналогов молока. Производство таких продуктов актуально для пищевой промышленности, за счет улучшения органолептических и функциональных свойств. Основными потребителями продукта выступают люди, исключаящие из рациона молочные продукты по медицинским предписаниям (пищевые аллергии, непереносимость лактозы, фенилкетонурия), личным вкусовым предпочтениям и другим причинам. Растительные альтернативы могут выступать заменой традиционным продуктам животного происхождения. В тоже время растительные субстраты являются стрессовой средой для молочнокислых бактерий, а особенности роста и развития пробиотических культур на такой среде малоизучены. Цель работы – изучение способности отечественных заквасочных культур к ферментации растительных аналогов молока (на примере соевого), а также изучение влияния ферментации на морфологию заквасочных культур. Объектами исследования являлись закваски: *Vivo* кефир, закваска для приготовления простокваши Мечниковской и йогурта, закваска для ацидофилина с пробиотическими свойствами, закваска прямого внесения «Бифивит». В статье описан опыт зарубежных исследователей в сфере ферментации растительных альтернатив. Также представлены результаты исследования интенсивности кислотообразования отечественных заквасочных культур, при ферментации на соевом молоке, их способность образовывать устойчивый сгусток. Описано влияние ферментации на морфологические свойства культур. Установлена способность некоторых культур молочнокислых микроорганизмов осуществлять ферментацию соевого субстрата с образованием плотного сгустка и титруемой кислотностью не менее 60 °Т. При этом наиболее подходящими для растительных субстратов являлись закваски, содержащие *Streptococcus thermophilus* и кефирные грибки.

**Ключевые слова:** Растительное молоко, ферментация, пробиотики, непереносимость лактозы, продукты питания.

## STUDY OF THE ABILITY OF LACTIC ACID BACTERIA TO FERMENT PLANT ANALOGUES OF MILK

© The Author(s) 2022

**SERAZETDINOVA Yulia Renatovna**, master's student of the Department of Bionanotechnology

**FROLOVA Anna Sergeevna**, master's student of the Department of Bionanotechnology

**MILENTYEVA Irina Sergeevna**, doctor of Technical Sciences,  
associate professor of the Department of Bionanotechnology  
**MININA Varvara Ivanovna**, doctor of Biological Sciences, professor,  
head Department of Genetics and Fundamental Medicine,  
*Kemerovo State University*  
(650000, Russia, Kemerovo, Krasnaya 6,

*e-mails: serazetdinova2000@mail.ru, fhyfyfhyfyfhy.af@mail.ru, irazumnikova@mail.ru, vminina@mail.ru)*

**Abstract.** In the work, the ability of lactic acid microorganisms to ferment vegetable analogues of milk is studied. The production of such products is relevant for the food industry, due to the improvement of organoleptic and functional properties. The main consumers of the product are people who exclude dairy products from the diet due to medical prescriptions (food allergies, lactose intolerance, phenylketonuria), personal taste preferences and other reasons. Plant-based alternatives can replace traditional animal products. At the same time, plant substrates are a stressful environment for lactic acid bacteria, and the characteristics of the growth and development of probiotic cultures on such an environment are poorly understood. The purpose of the work is to study the ability of domestic starter cultures to ferment plant analogues of milk (for example, soy), as well as the effect of fermentation on the morphology of starter cultures. The objects of the study were starter cultures: *Vivo* kefir, starter culture for the preparation of Mechnikovskaya yogurt and yogurt, acidophilus starter culture with probiotic properties, direct application starter culture "Bifivit". The article describes the experience of foreign researchers in the field of fermentation of plant alternatives. Also presented are the results of a study of the intensity of acid formation of domestic starter cultures during fermentation on soy milk, their ability to form a stable clot. The effect of fermentation on the morphological properties of cultures is described. The ability of some cultures of lactic acid microorganisms to ferment soy substrate with the formation of a dense clot and a titratable acidity of at least 60 °T has been established. At the same time, starter cultures containing *Streptococcus thermophilus* and kefir fungi were the most suitable for plant substrates.

**Keywords:** plant milk, fermentation, probiotics, lactose intolerance, food.

**Для цитирования:** Серазетдинова Ю.Р. Изучение способности молочнокислых бактерий к ферментации растительных аналогов молока / Ю.Р. Серазетдинова, А.С. Фролова, И.С. Милентьева, В.И. Минина // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022. – Т. 11. – № 3(59). – С. 128-134. – DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0019.

**Введение.** Молоко и кисломолочные продукты являются основой постоянного рациона в большинстве регионов нашей страны. Состав данных продуктов включает биологически активные и ценные питательные вещества, пре- и пробиотики, необходимые для нормального роста и развития организма. В тоже время, существуют группы людей, в рационе которых должны отсутствовать продукты, содержащие молоко.

Исключение из рациона данных продуктов связано с наличием таких заболеваний, как: аллергия на коровье молоко, непереносимость лактозы, фенилкетонурия. В некоторых случаях отказ от молока может быть вызван личными вкусовыми предпочтениями либо жизненной позицией (веганство, экоактивизм, и т.д.) [1, 2].

Обогатить рацион данных групп населения пре- и пробиотиками, а также биологически активными веществами, высвобождающимися в процессе ферментации – актуальная задача для пищевой промышленности.

Заменой коровьему молоку могут выступать растительные альтернативы – продукты, получаемые экстракцией бобовых, злаков, орехов. Растительные аналоги молока содержат в своем составе витамины, минералы и антиоксиданты, за счет чего оказывают положительное влияние на здоровье человека. Так, например, диета с высоким потреблением растительных продуктов снижает риск развития

сердечнососудистых и нейродегенеративных заболеваний (в частности болезни Альцгеймера) [3, 4].

В тоже время польза растительных альтернатив ограничивается антипитательными веществами, снижающими биологическую доступность витаминов и минералов. Решением данной проблемы может служить ферментация растительных субстратов. Так, например, согласно литературным данным ферментация способна повысить биологическую доступность кальция [5].

Наиболее подходящим альтернативным субстратом для ферментации является соя, за счет аминокислотного состава, оптимального для питания человека. Бобовые содержат такие незаменимые аминокислоты, как лизин, аргинин, лейцин и др. (кроме сернистых аминокислот и триптофана). Пробиотические соевые напитки могут оказывать положительное влияние на здоровье человека за счет антигипертензивного эффекта, снижения уровня холестерина, антидиабетического потенциала и т.д. [6].

Несмотря на пользу соевых продуктов, некоторые потребители могут исключать их из рациона из-за бобового привкуса, обусловленного содержанием н-гексанол и пентанола. Поэтому производство соевых альтернатив должно включать дополнительные технологические операции, позволяющие избавиться от привкуса, например, бланширование или прощивание [7].

Еще одним негативным аспектом употребления

сои являются пищевые аллергии. Этот вид аллергии особенно часто встречается у грудных детей. Так, около половины процента годовалых детей страдают аллергией на сою, однако к 7 годам распространенность этого заболевания снижается вдвое. При этом ферментация соевых продуктов также способствует снижению аллергенности. Сообщается, что концентрация некоторых антипитательных веществ в сое, таких как фитиновая кислота, ингибитор трипсина и уреазы, значительно уменьшается в результате ферментации, при этом увеличивается биодоступность минералов [7, 8].

Немаловажным этапом в разработке ферментированных соевых продуктов является подбор заквасочных культур. Соевое молоко, не смотря на свою приближенность к коровьему, является стрессовой средой для молочнокислых бактерий. В результате этого выращенные в ней культуры могут демонстрировать специфические рост и накопление молочной кислоты. В большинстве случаев замена коровьего молока на соевое при ферментации приводит к более медленному накоплению кислот, в результате чего продолжительность ферментации увеличивается. Медленное подкисление продукта может провоцировать рост посторонней микрофлоры, а также возникновение пороков качества. Исследования показывают, что в целом ферментация растительных субстратов должна осуществляться за 12-16 ч, при этом конечный *pH* продукта не должен быть ниже 4,6. Высокая скорость накопления кислот (ниже 4,5 в течение 4 ч) также приводит к порокам качества, провоцируя образование сгустка низкой плотности [9].

Для ферментации растительных субстратов наиболее рационально использование *Streptococcus thermophilus*, из-за его способности к сквашиванию не только лактозы (молочно сахара), но и других углеводов. В частности термофильный стрептококк способен сбраживать сахарозу.

Имеются данные о том, что *Streptococcus thermophilus* LMD-9 метаболически активен в соевом молоке, при выращивании в котором штамм демонстрировал более высокий уровень подкисления ( $\Delta pH$  2,6 за 5 ч), чем другие штаммы *S. thermophilus*, изученные в настоящее время. *Streptococcus thermophilus* LMD-9 растет в соевом молоке за счет потребления сахарозы. При этом некоторые штаммы демонстрируют сходную динамику роста и подкисления в соевом и коровьем молоке [10].

Наиболее часто термофильный стрептококк используют в совокупности с болгарской палочкой. Известны взаимодействия между этими заквасками в коровьем молоке. *L. delbrueckii subsp. bulgaricus* продуцирует пептиды и свободные аминокислоты, в то время как *S. thermophilus* обеспечивает метаболиты, такие как муравьиная кислота, пировиноградная кислота, фолиевая кислота и диоксид углерода.

Особенности роста болгарской палочки при культивировании в соевом молоке практически не

изучены. В исследованиях ее обычно применяют в совокупности с *S. thermophilus*, как и в коровьем молоке. Немногочисленные зарубежные исследования демонстрируют, что при совместном культивировании в растительных субстратах данных культур преобладает термофильный стрептококк, продуцируя избыток диацетила. При этом рост болгарской палочки практически не наблюдается.

Угнетение болгарской палочки в растительном молоке объясняется особенностями ее метаболизма, а также химическим составом соевого молока. *L. delbrueckii subsp. Bulgaricus* не способна использовать в качестве источника углерода сахарозу (содержание в сое 1,1–7,4 % сухой массы семян). Поэтому единственными источниками углерода в соевом молоке выступают глюкоза и фруктоза, содержание которых в субстрате сравнительно мало (0,03–2,4 % сухой массы семян) [11]. Также ограниченный рост болгарской палочки может быть связан с отсутствием пригодного для использования источника азота и высокой ауксотрофностью (потребностью в специфических аминокислотах, в особенности с разветвленной цепью) [12].

Для ферментации сои могут применяться и *Bifidobacterium*, которые обладают эндогенными  $\beta$ -глюкозидазами, играющими важную роль в биоконверсии гликозилизофлавонов во время ферментации. В сое в основном присутствуют изофлавоны в гликозильных формах, но могут присутствовать небольшие количества изофлавонов в агликоновых формах. Согласно исследованиям *A.R. Olmos B. Longum CRL 849*, способный выживать в условиях ЖКТ, увеличивал количество биологически активных изофлавонов в сое. Данный штамм способен потреблять сахарозу из растительных субстратов и продуцировать молочную и уксусную кислоты. Обогащение продуктов питания изофлаванами является перспективным, так как они играют важную роль при профилактике рака, сердечно сосудистых заболеваний, остеопороза [13-15].

Также известно, что *Lactobacillus rhamnosus (L.) CRL981*, выращенный в соевом молоке, полностью гидролизует изофлавоновые глюкозиды в их агликоновые формы за 12 ч инкубации. Соевое молоко, ферментированное данным штаммом, обладало высокой антиоксидантной активностью, а также способностью ингибировать окисление ДНК [16].

Таким образом, ферментация растительных субстратов способна не только улучшить органолептические показатели продукта, но и усилить его функциональные качества. Целью работы является изучение способности отечественных заквасочных культур к ферментации растительных аналогов молока (на примере соевого), а также изучение влияния ферментации на морфологию заквасочных культур.

**Методология.** Объектами исследования являлись:

- 1) напиток *Nemoloko* соевое *Barista* ТУ 10.86. 10-037-48066304-2020;
- 2) закваска *Vivo* кефир ТУ 9223-001-18137828-

2014;

3) закваска для приготовления простокваши Мечниковской и йогурта ТУ 9229-001-18810509-2015;

4) закваска для ацидофилина с пробиотическими свойствами ТУ 9229-001-18810509-2015;

5) закваска прямого внесения «Бифивит» ТУ 9229-002-02069473–2015;

6) глюкоза кристаллическая ГОСТ 975-88;

7) молоко *Простоквашино* ТУ 10.51.11-050-13605199.

Для приготовления маточных заквасок на растительном молоке, соевое молоко стерилизовали, остужали до температуры сквашивания, после чего в асептических условиях вносили заквасочные культуры. Далее содержимое колб перемешивали и выдерживали в термостате при температуре 39°C (термофильные закваски) и 30°C (мезофильные закваски) в течение 16 часов. Лабораторные закваски готовили, аналогично внося 5% маточной закваски, во время культивирования каждый час, отслеживая титруемую кислотность.

Титруемую кислотность растительного молока и заквасок определяли согласно ГОСТ 3624-92 «Молоко и молочные продукты. Титриметрические методы определения кислотности».

Микроскопирование образцов проводили с использованием метиленового синего согласно ГОСТ 32901 – 2014 «Молоко и молочная продукция. Методы

микробиологического анализа».

**Результаты.** Для предварительной оценки способности заквасочных культур сквашивать растительное молоко готовили маточные закваски на стерильном соевом молоке. В таблице 1 представлены результаты приготовления лабораторной закваски.

Отбор микроорганизмов для дальнейших исследований производили по следующим критериям: способность к формированию устойчивого сгустка, способность сквашивать растительные альтернативы молока и сохранять жизнеспособность.

Согласно полученным данным, закваска «Бифивит» наименее приспособлена к ферментации растительных субстратов. Культивирование в соевом молоке показало, что штамм *Bifidobacterium longum*, используемый в данной закваске, не способен к накоплению молочной кислоты и образованию сгустка. После 24 ч культивирования титруемая кислотность маточной закваски составила 10°Т. При микроскопировании образца обнаружены единичные слабо развитые палочки.

Рационально предположить, что *Bifidobacterium longum* в составе закваски «Бифивит» не способен использовать в качестве источника углерода олигосахариды, присутствующие в соевом молоке, что делает невозможным его применение для производства растительных ферментированных продуктов.

Таблица 1 – Подбор заквасочных культур для ферментации растительного молока

Параметр	Наименование закваски			
	Закваска «Бифивит»	Закваска для приготовления простокваши Мечниковской и йогурта	Закваска Vivo кефир	Закваска для ацидофилина с пробиотическими свойствами
Состав	<i>Bifidobacterium longum</i>	<i>Streptococcus thermophilus</i> , <i>Lactobacillus delbrueckii</i> subsp. <i>bulgaricus</i>	Кефирные грибки	<i>Lactobacillus acidophilus</i>
Наличие плотного, устойчивого сгустка	Сгусток не образуется	Устойчивый плотный сгусток	Устойчивый плотный сгусток	Сгусток не плотный
Развитие микроорганизма	Обнаружены единичные палочки	Палочки и кокки хорошо развиты	Хорошо развиты	Хорошо развитые палочки
Продолжительность образования сгустка, ч	–	10	7	16
Титруемая кислотность, °Т	10,7	67,9	55,6	40,2

Как самостоятельная заквасочная культура не подходит для производства растительных альтернатив и *Lactobacillus acidophilus*. Данный микроорганизм способен образовывать неплотный сгусток при продолжительном сквашивании, однако степень накопления кислот недостаточна для обеспечения качества продукта и подавления посторонней микрофлоры. В тоже время рационально использование *Lactobacillus acidophilus* в качестве функциональной добавки в совокупности с более подходящими для ферментации растительных субстратов культурами. Согласно литературным данным, ацидофильная палочка способна вступать в симбиотические отношения с другими молочнокислыми микроорганизмами, а также обладает рядом полезных для организма свойств, что делает

ее перспективной при разработке симбиотических заквасок для растительных субстратов. В данной сфере требуется проведение дополнительных исследований [17].

Также при культивировании закваски содержащей *Lactobacillus acidophilus* наблюдали значительное расслоение продукта (около 1/5 соевой сыворотки от всего объема закваски без внешнего воздействия), и небольшую коагуляцию молочных белков. Данные свойства закваски могут применяться для производства сыров на растительной основе, которые в настоящее время производят в основном с помощью коагулянтов либо разрушением растительных тканей [18, 19].

Наиболее подходящими для ферментации растительного субстрата являются *Streptococcus ther-*

*mophilus*, *Lactobacillus delbrueckii subsp. Bulgaricus*, а также кефирные грибки. Данные заквасочные культуры способны к образованию плотного устойчивого сгустка за 7-9 часов культивирования. При микроскопировании маточной закваски для йогурта обнаружены палочки правильной формы, а также хорошо развитые кокки, образующие длинные цепочки (до 40 шт. в цепочке).

Из подходящих для ферментации растительных субстратов культур готовили лабораторные закваски, которые проверяли на интенсивность кислотообразования (рис. 1). Согласно полученным данным, сквашивание всех образцов проходило равномерно, без резких скачков. Для образования плотного, устойчивого сгустка и накопления кислотности не менее 60°Т образцам на растительной основе требовалась выдержка от 6 до 10 часов при температуре 39°С. Закваска для кефира демонстрировала более быстрое накопление органических кислот на начальном этапе, однако  $\Delta^{\circ}\text{T}$  готовых продуктов для соевых кефира и йогурта составила 9. Следует отметить, что скорость накопления кислот в ферментированных соевых продуктах по сравнению с контрольными образцами (на коровьем молоке) была снижена. Так,  $\Delta^{\circ}\text{T}$  после 10 часов культивирования для йогурта составила 50,4,

для кефира 63,5. Для определения влияния пересевов на заквасочные культуры (при культивировании в соевом молоке) проводили микроскопирование лабораторных заквасок. Значительных отличий в морфологии кефирной закваски не наблюдалось, при этом в закваске для йогурта отмечено отсутствие болгарской палочки. Развитие термофильного стрептококка не отличалось от контрольного образца на коровьем молоке (длина цепочек около 40 кокков).

Для стимулирования роста *Lactobacillus delbrueckii subsp. Bulgaricus* и оптимизации процесса ферментации, в некоторые образцы, дополнительно вносили глюкозу в концентрациях 1 и 2% от объема соевого молока. Для исследования влияния добавки на интенсивность кислотообразования в процессе культивирования образцов отслеживали изменение титруемой кислотности (рис. 2).

Согласно полученным данным, внесение глюкозы в субстрат как в 1%, так и в 2% не оказывало значительного воздействия на скорость образования кислот в образце. Можно предположить, что основную роль в подкислении соевого молока играет *Streptococcus thermophilus*. В тоже время, это может говорить о недостаточной концентрации вносимой добавки для стимулирования роста болгарской палочки.

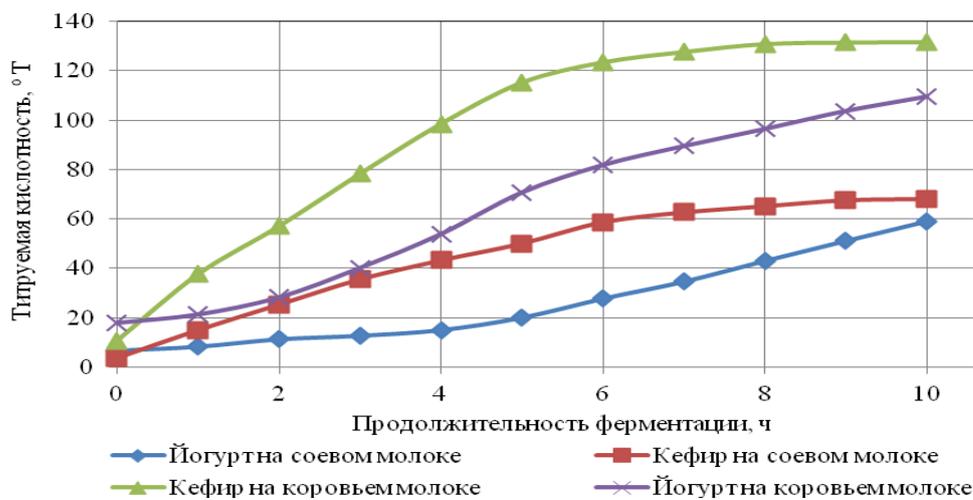


Рисунок 1 – Интенсивность кислотообразования заквасочных культур на растительном молоке

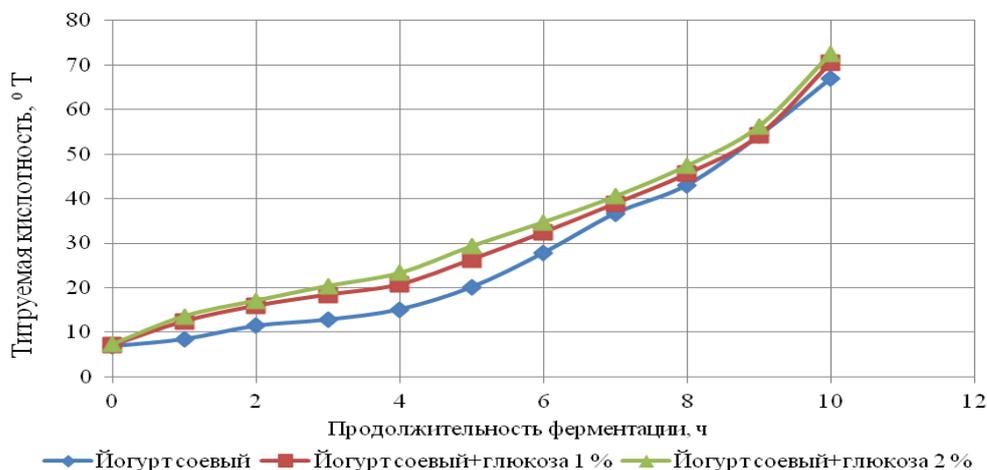


Рисунок 2 – Интенсивность кислотообразования при ферментации с добавлением глюкозы

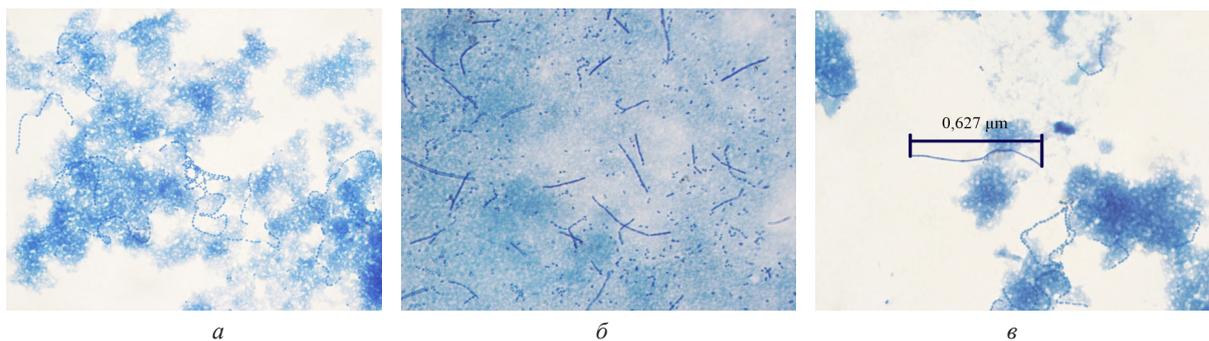


Рисунок 3 – Микроскопия лабораторных заквасок, 100х: а – морфология закваски на соевом молоке, б – морфология закваски на коровьем молоке, в – морфология закваски на соевом молоке с глюкозой

Микроскопирование лабораторных заквасок показало, что внесение глюкозы как в 1%, так и в 2% способствовало сохранению в закваске болгарской палочки (рис. 3). Однако наблюдалась деформация и сегментация палочек, что может говорить о том, что соевое молоко – стрессовая среда, не способная поддерживать длительное сохранение жизнеспособности болгарской палочки.

**Обсуждение.** В ходе работы подтверждена способность некоторых отечественных заквасочных культур молочнокислых к ферментации растительных аналогов молока. Полученные результаты согласуются с результатами исследователей работающих в данной сфере. Например, I. Atalar в своей работе описывает способность кефирных грибков сквашивать молоко из фундука. При этом существуют данные о способности кефирной закваски осуществлять и ферментацию арахисовых субстратов, увеличивая антиоксидантные свойства продукта [20, 21].

Способность некоторых веществ стимулировать процесс ферментации (с использованием молочнокислых бактерий) также активно рассматривается учеными. Например, V. Agasaratnam с соавторами доказали, что добавление в субстрат таких вспомогательных веществ, как глюкоза и дрожжевой экстракт позволяло увеличить накопление органических кислот в образцах, содержащих болгарскую палочку [22]. Интенсифицировать ферментацию способны и другие вещества, например, E. Yamamoto с соавторами, показали, что добавление в субстрат фумаровой кислоты сокращает длительность ферментации [23].

Производство ферментированных растительных альтернатив, является актуальным в наше время. И позволяет получать продукты с усиленными функциональными свойствами для группы потребителей неспособных употреблять молочные продукты. Важным этапом в разработке растительных аналогов является подбор заквасочных культур, проведенный в данном исследовании. Для дальнейшей разработки таких продуктов питания необходимо изучить свойства молочнокислых микроорганизмов, выращенных на растительных субстратах и установить разницу в метаболизме с культурами, выращенными на коровьем молоке. Также рационально оценить

влияние срока хранения на количественный и качественный состав заквасочных культур, так как сохранение пробиотиками жизнеспособности на протяжении всего срока хранения – важнейший показатель качества функциональных пробиотических продуктов.

**Выводы.** Производство растительных альтернатив – перспективное направление развития для пищевой промышленности. Создание таких продуктов позволит обогатить рацион людей, не употребляющих молоко и молочные продукты, пробиотиками и биологически активными веществами. Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

- некоторые культуры молочнокислых микроорганизмов способны осуществлять ферментацию соевого субстрата с образованием плотного густка и титруемой кислотностью не менее 60°Т;
- наиболее подходящими для растительных субстратов являются закваски, содержащие *Streptococcus thermophilus* и кефирные грибки;
- пересевы болгарской палочки в процессе культивирования на растительных субстратах приводят к деформации и сегментации палочек;
- для сохранения свойств и поддержания жизнеспособности *Lactobacillus delbrueckii subsp. Bulgaricus* рационально внесение в соевый субстрат дополнительных факторов роста, источников углерода и азота;
- для производства продуктов на растительной основе с использованием молочнокислых микроорганизмов рекомендуется использовать закваски прямого внесения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Němečková I., Dragounova H., Pechačova M., Rysova J., Roubal P. Fermentation of Vegetable Substrates by Lactic Acid Bacteria as a Basis of Functional Foods. // Czech Journal of Food Sciences. – 2011. – Vol. 29. – P. S42–S48. <https://doi.org/10.17221/282/2011-CJFS>.
2. Escobar-Saez D., Montero-Jiménez L., Garcia-Herrera P., Sanchez-Mata M.S. Plant-based drinks for vegetarian or vegan toddlers: Nutritional evaluation of commercial products, and review of health benefits and potential concerns // Food Research International. – 2022. – Vol. 160. – P. 111646. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111646>.
3. Aydar E.F., Tutuncu S., Ozcelik B. Plant-based milk substitutes: Bioactive compounds, conventional and novel processes, bioavailability studies, and health effects // Journal of Functional Foods. – 2020. – Vol. 20. – P. 103975. <https://doi.org/10.1016/j.jff>.

jff.2020.103975.

4. Pistollato F., Iglesias R.S., Ruiz R., Aparicio S., Crespo J., Lopez L.D., Manna P.P., Giampieri F., Battino M. Nutritional patterns associated with the maintenance of neurocognitive functions and the risk of dementia and Alzheimer's disease: A focus on human studies // *Pharmacological Research*. – 2018. – Vol. 131. – P. 32–43. <https://doi.org/10.1016/j.phrs.2018.03.012>.

5. Dubey M.R., Patel V.P. Probiotics: A Promising Tool for Calcium Absorption // *The Open Nutrition Journal*. – 2021. – Vol. 15. – P. 59–69. <http://dx.doi.org/10.2174/1874288201812010059>

6. Das D., Kabir M.E., Sarkar S., Wann S.B., Kalita J., Manna P. Antidiabetic potential of soy protein/peptide: A therapeutic insight // *International Journal of Biological Macromolecules*. – 2022. – Vol. 194. – P. 276–288. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.11.131>.

7. Moss R., Barker S., Falkeisen A., Gorman M., Knowles S., Sweeney M.B. An investigation into consumer perception and attitudes towards plant-based alternatives to milk // *Food Research International*. – 2022. – Vol. 159. – P. 111648. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111648>.

8. Peng X., Liao Y., Ren K., Liu Y., Wang M., Yu A., Tian T., Liao P., Huang Z., Wang H., Jiang L. Fermentation performance, nutrient composition, and flavor volatiles in soy milk after mixed culture fermentation // *Process Biochemistry*. – 2022. – Vol. 121. – P. 286–297. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2022.07.018>.

9. Cai J.S., Feng J.Y., Ni Z.J., Ma R.H., Thakur K., Wang S., Hu F., Zhang J.G., Wei Z.J. An update on the nutritional, functional, sensory characteristics of soy products, and applications of new processing strategies // *Trends in Food Science & Technology*. – 2021. – Vol. 112. – P. 676–689. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.04.039>.

10. Boulay M., Haddad M.A., Rul F. Streptococcus thermophilus growth in soya milk: Sucrose consumption, nitrogen metabolism, soya protein hydrolysis and role of the cell-wall protease PrtS. // *International Journal of Food Microbiology*. – 2020. – Vol. 335. – P. 108903. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108903>.

11. Medic J., Atkinson C., Hurburgh Jr. C.R. Current Knowledge in Soybean Composition // *JAOCS*. – 2014. – Vol. 91. – P. 363–384. <https://doi.org/10.1007/s11746-013-2407-9>.

12. Jan G., Briard-Bion V., Carmo F.L.R., Illikoud N., Canon F., Jardin J., Briard-Bion V., Guyomarc'h F., Gagnaire V. The stressing life of Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus in soy milk // *Food Microbiology*. – 2022. – Vol. 106. – P. 104042. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2022.104042>.

13. Olmos A.R., Garro O.A., Garro M.S. Behavior study of Bifidobacterium longum using solid state fermentation from commercial soybean meal // *LWT*. – 2020. – Vol. 157. – P. 113101. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113101>.

14. Olmos A.R., Bru E., Garro M.S. Optimization of fermentation parameters to study the behavior of selected lactic cultures on soy solid state fermentation // *International Journal of Food Microbiology*. – 2015. – Vol. 196. – P. 16–23. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2014.11.030>.

15. Marazza J.A., Nazareno M.A., Giori G.S., Garro M.S. Bioactive action of  $\beta$ -glucosidase enzyme of Bifidobacterium longum upon isoflavone glucosides present in soymilk // *Science and Technology*. – 2013. – T. 48. – P. 2480–2489. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12239>.

16. Marazza J.A., Nazareno M.A., Giori G.S., Garro M.S. Enhancement of the antioxidant capacity of soymilk by fermentation with Lactobacillus rhamnosus // *Sciverse Science-Direct*. – 2012. – Vol. 4. – P. 594–601. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2012.03.005>.

17. Бояринева И.В. Пробиотические свойства и актуальность практического применения L. Acidophilus // *Вестник хабаровского государственного университета экономики и права*. – 2021. – № 2(106). – С. 70–75..

18. Oyeyinka T.A., Odukoya J.O., Adebayo Y.S. Nutritional composition and consumer acceptability of cheese analog from soy and cashew nut milk // *J Food Process Preserv*. – 2019. – Vol. 43. – P. e14285. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14285>.

19. David L.G., Clements J.M. The science of plant-based foods: Approaches to create nutritious and sustainable plant-based cheese analogs // *Trends in Food Science & Technology*. – 2021. – Vol. 118. – P. 207–229. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.10.004>.

20. Atalar I. Functional kefir production from high pressure homogenized hazelnut milk // *LWT*. – 2019. – Vol. 107. – P. 256–

263. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.03.013>.

21. M. Bensmira, B. Jiang Total phenolic compounds and antioxidant activity of a novel peanut based kefir // *Food Science and Biotechnology*. – 2015. – Vol. 56. – P. 1055–1060. <https://doi.org/10.1007/s10068-015-0135-7>.

22. Arasaratnam V., Senthuran A., Balasubramaniam K. Supplementation of whey with glucose and different nitrogen sources for lactic acid production by Lactobacillus delbrueckii // *Enzyme and Microbial Technology*. – 1996. – Vol. 19. – P. 482–486. [https://doi.org/10.1016/S0141-0229\(95\)00147-6](https://doi.org/10.1016/S0141-0229(95)00147-6).

23. Yamamoto E., Watanabe R., Tooyama E., Kimura K. Effect of fumaric acid on the growth of Lactobacillus delbrueckii ssp. bulgaricus during yogurt fermentation // *Journal of Dairy Science*. – 2021. – Vol. 104. – P. 9617–9626. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-20173>.

**Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Инструментальные методы анализа в области прикладной биотехнологии» на базе ФГБОУ ВО «КемГУ»**

*Статья поступила в редакцию 16.08.2022*

*Статья принята к публикации 16.09.2022*

УДК 664.663.9

DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0020

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОРОШКА ТОПИНАМБУРА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПШЕНИЧНОГО ХЛЕБА**

© Автор(ы) 2022

SPIN: 3443-9992

AuthorID: 834745

ORCID: 0000-0002-5816-3596

**ВАРЛАМОВА Елена Николаевна**, кандидат сельскохозяйственных наук,

доцент кафедры «Переработка сельскохозяйственной продукции»

*Пензенский государственный аграрный университет**(440014, Россия, Пенза, улица Ботаническая, 30, e-mail: varlamova.e.n@pgau.ru)*

SPIN: 7081-4490

AuthorID: 618456

ORCID: 0000-0002-1233-1304

**СЛУГИНОВА Наталья Ивановна**, кандидат сельскохозяйственных наук,

доцент кафедры «Биотехнологии и техносферная безопасность»

*Пензенский государственный технологический университет**(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11, e-mail: Princess\_natalia@mail.ru)*

SPIN: 8085-8755

AuthorID: 8030026

ORCID: 0000-0002-8610-9458

**ЗУЕВА Елена Александровна**, кандидат сельскохозяйственных наук,

доцент кафедры «Переработка сельскохозяйственной продукции»

*Пензенский государственный аграрный университет**(440014, Россия, Пенза, улица Ботаническая, 30, e-mail: zueva.e.a@pgau.ru)*

SPIN: 3470-7793

AuthorID: 870040

ORCID: 0000-0002-1814-1106

**ПАНФИЛОВА Ирина Сергеевна**,

преподаватель кафедры «Общей и прикладной физики»

*Национальный Исследовательский Московский Государственный Строительный Университет**(129337, Россия, Москва, улица Ярославское шоссе, 26, кор., e-mail: kanz@mgsu.ru)*

**Аннотация.** В статье рассмотрена возможность применения порошка топинамбура в рецептурах новых видов пшеничного хлеба. Проанализировав полученные данные, можно с уверенностью сказать, что использование порошка топинамбура при производстве хлеба позволит увеличить ассортимент выпускаемой продукции хлебозаводов. Потребители получат функциональный продукт с высокими показателями качества. Формирование крепкого клейковинного каркаса, при использовании порошка топинамбура способствовало связыванию и удержанию воды в изделиях. Проведенные нами исследования органолептической оценки готового продукта показали, что визуальная оценка контрольного образца соответствовала 4,7 баллам. Равномерный цвет корки, правильная форма хлеба. Добавка 3% порошка топинамбура позволила продукту улучшить органолептические показатели. Хлеб имел очень нежный мякиш, равномерную пористость. Поверхность корки у всех исследуемых образцов была в пределах допустимых значений, но с увеличением содержания порошка топинамбура в продукте поверхность корки становилась идеальной, что указывает на улучшение структурно-механических показателей продукта. Цвет мякиша у всех образцов был одинаков и не имел отличий в сравнении с контрольным образцом. Влажность полученного продукта увеличивалась по сравнению с контрольным образцом – 43%, по мере увеличения содержания порошка топинамбура в продукте достигла максимального значения – 43,4% (образец с порошком топинамбура (7%)). Кислотность исследуемых образцов изменилась незначительно с увеличением содержания порошка топинамбура. Контрольный образец имел кислотность 2,4 град, а образец с порошком топинамбура (7%) – 2,6 град.

**Ключевые слова:** пшеничный хлеб, порошок топинамбура, технология производства пшеничного хлеба.

**THE USE OF JERUSALEM ARTICHOKE POWDER IN THE PRODUCTION OF WHEAT BREAD**

© Author(s) 2022

**VARLAMOVA Elena Nikolaevna**, candidate of Agricultural Sciences,  
associate professor of the Department "Processing of agricultural products"*Penza State Agrarian University**(30 Botanic Street, Penza, 440014, Russia, e-mail: varlamova.e.n@pgau.ru)***SLUGINOVA Natalya Ivanovna**, candidate of Agricultural Sciences,

associate professor of the Department of Biotechnology and Technosphere Safety  
*Penza State Technological University*  
(440039, Russia, Penza, Baidukova Passage/ul. Gagarina, 1a/11, e-mail: Princess\_natalia@mail.ru)

**ZUEVA Elena Aleksandrovna**, candidate of Agricultural Sciences,  
associate professor of the Department "Processing of agricultural products"  
*Penza State Agrarian University*  
(30 Botanic Street, Penza, 440014, Russia, e-mail: zueva.e.a@pgau.ru)

**PANFILOVA Irina Sergeevna**,  
lecturer at the Department of General and Applied Physics  
*National Research Moscow State Construction University*  
(129337, Russia, Moscow, street Yaroslavskoe shosse, 26, corr., e-mail: kanz@mgsu.ru)

**Abstract.** The article considers the possibility of using jerusalem artichoke powder in the formulations of new types of wheat bread. After analyzing the data obtained, we can say with confidence that the use of jerusalem artichoke powder in the production of bread will increase the range of bakery products. Consumers will receive a functional product with high quality indicators. The formation of a strong gluten frame, when using Jerusalem artichoke powder, contributed to the binding and retention of water in the products. Our studies of the organoleptic evaluation of the finished product showed that the visual evaluation of the control sample corresponded to 4.7 points. Uniform color of the crust, the correct shape of the bread. The addition of 3% jerusalem artichoke powder allowed the product to improve organoleptic parameters. The bread had a very tender crumb, uniform porosity. The surface of the crust in all the studied samples was within acceptable values, but with an increase in the content of jerusalem artichoke powder in the product, the surface of the crust became perfect. Which indicates an improvement in the structural and mechanical characteristics of the product. The color of the crumb in all samples was the same, and had no differences in comparison with the control sample. The moisture content of the resulting product increased, compared with the control sample – 43%, as the content of jerusalem artichoke powder in the product increased and reached a maximum value of 43.4% (a sample with jerusalem artichoke powder (7%)). The acidity of the studied samples did not change significantly with an increase in the content of jerusalem artichoke powder. The control sample had an acidity of 2.4 degrees, and the sample with jerusalem artichoke powder (7%) – 2.6 degrees.

**Keywords:** wheat bread, jerusalem artichoke powder, wheat bread production technology.

**Для цитирования:** Варламова Е.Н. Использование порошка топинамбура при производстве пшеничного хлеба / Е.Н. Варламова, Н.И. Слугинова, Е.А. Зуева, И.С. Панфилова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022. – Т. 11. – № 3(59). – С. 135-140. – DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0020.

**Введение.** В настоящее время общество и государство обеспокоены тенденцией увеличения численности населения с избыточным отложением жира в организме. Проблема принимает масштабы неинфекционной эпидемии. Темпы проникновения заболевания в нашу жизнь чудовищны. Ожирение способствует развитию таких заболеваний как сахарный диабет, метаболический синдром, кардиопатия и другие, не менее серьезные расстройства организма человека.

Решить проблемы только медикаментозными средствами не всегда удается. Пищевые продукты функционального назначения способны помочь в решении данной проблемы. Основным продуктом питания населения, независимо от материального статуса человека, является хлеб. В состав хлеба входят: вода – 37,7%, крахмал и декстрины – 47%, белки – 7,9%, клетчатка – 4%, жиры – 1% [1-4].

Низкоуглеводная диета для снижения массы тела ограничивает потребление сложных углеводов, простые углеводы выводятся из рациона полностью. Проанализировав работы гастроэнтерологов, мы пришли к выводу, что исключение хлеба из питания взрослого человека неоправданно. В состав хлеба входит клетчатка – это вещество, не усваивающееся в пищеварительной системе человека. Она представляет

собой балластные волокна, способствующие правильной работе желудочно-кишечного тракта, но не имеющие ни какой питательной ценности. Неправильная работа желудочно-кишечного тракта ведет к постепенному подрыву всех функций нашего организма. Первым снижается иммунитет. Затем, как «снежный ком», начинают развиваться гипертония, диабет. Включать в рацион продукты, богатые клетчаткой советуют многие специалисты диетического питания. Поэтому представляется логичным использование в производстве хлеба нетрадиционного сырья растительного происхождения, что позволяет обогатить продукт витаминами и микроэлементами, не входящими в состав основного сырья [3].

Обогатить продукты питания жирорастворимыми витаминами, витаминами группы В, пищевыми волокнами и минеральными веществами позволит частичная замена основного сырья [4-9].

Топинамбур – культура, способная помочь решить поставленные нами задачи. В его клубнях содержится 18,1-24,0% сухих веществ, большая часть которых углеводы, содержащие такой нужный при ожирении и для диабетиков – инулин – полисахарид полифруктозного типа, не вызывающий повышения содержания сахара в крови. Он же

выводит из организма соли тяжелых металлов, яды, радионуклиды, холестерин высокой плотности, что обуславливает его антисклеротическое, желче- и мочегонное действие [10, 11].

Клубни топинамбура содержат: фосфор (3,7% от общей золы), калий (47,7%), железо (3,7%), кремний (10,0%), кальций (3,3%), хлор (3,2%), каротин (12-42 мг/кг), витамин С (42-318 мг), В1 (7,6мг), В2 (0,8-3 мг), РР (10,7-27,2 мг), холин (1936-3100 мг). По указанным показателям, они превосходят традиционный наш продукт - картофель [10].

Систематическое потребление топинамбура помогает организму человека повышать иммунитет, становиться устойчивым к стрессам и болезням, что очень актуально в настоящее время [4,10].

Задача ученых всех уровней – поиск природных биологически активных соединений, дающих возможность организму противостоять воздействию неблагоприятных факторов окружающей среды, а также способствующих поддержанию и оздоровлению организма человека [12-15].

*Цель* работы – разработать научно-практические рекомендации по совершенствованию технологии производства пшеничного хлеба, с использованием порошка топинамбура. В задачи исследований входило:

- разработать технологию производства хлеба пшеничного с частичной заменой сырья;
- изучить влияние порошка топинамбура на технологические и физико-химические свойства готового продукта;
- провести органолептическую оценку полученного продукта.

**Методология.** Порошок топинамбура, соответствует ГУ 9264-001-17912573-2001, – рассыпчатая масса бежевого цвета. Не растворим в воде. При намокании темнеет до очень темного, почти коричневого цвета и становится пластичным, мягким. Имеет запах схожий с запахом растительного масла. Присутствует небольшая сладость, если попробовать продукт на вкус. Массовая доля всех сахаров – 70%. Помол – 0,3 мм. Влажность – 6%. Порошок гигроскопичен. Предназначен для использования при производстве всех пищевых продуктов, пищевых и биологических добавок. Изготавливается из свежих клубней топинамбура [15, 16].

Согласно ГОСТу 27699 – 88 нами были проведены лабораторные выпечки, позволяющие определить качественные показатели полученного продукта. Для контрольного образца была использована классическая рецептура хлеба пшеничного. Мука пшеничная первого сорта, соль, сахар, вода, дрожжи. При приготовлении теста для изучения пшеничного хлеба с добавлением порошка топинамбура была использована следующая технологическая схема производства хлеба. Порошок топинамбура вносили в тесто – 3, 5 и 7%, к массе муки. Использовали опарный способ приготовления теста. В теплую воду – 35°C, добавляли дрожжи, часть муки и перемешивали до

получения равномерной массы. Тесто оставляли для брожения с оптимальной температурой 32°C – на 110-130 минут. Оставшуюся воду и муку всыпали к опаре. Произвели замес теста, оставили для дальнейшего брожения на 150 минут, температуру снизили до 30°C. После расстойки теста выпекали хлеб. Готовым изделиям давали остыть не менее 3-4 часов, чтобы провести органолептическую и физико-химическую оценку качества полученных образцов [17, 18].

Сравнительная органолептическая оценка основывалась на внешних показателях продукта: соответствии форме хлеба, наличии трещин, цвете и толщине корки. Хлеб разрезали и визуально определили пористость изделий, пропеченность мякиша, методом надавливания. Определили окрас мякиша. Вкус полученных изделий, аромат и запах определялись при температуре 20°C, путем разжевывания и восприятия запахов.

Физико-химические показатели готового продукта определялись в соответствии с ГОСТом 5669-96, ГОСТом 21094-75, ГОСТом 5670-96. Нами были определены такие показатели как влажность готового продукта, его пористость, кислотность.

Влажность определялась путем высушивания измельченного мякиша образцов, при температуре 130°C, сушку проводили 45 минут. Затем охлаждали бюксы 2 часа в эксикаторе. Взвешивали остывшие бюксы и, используя полученные показатели, рассчитывали процентное содержание влаги исследуемых образцов.

Определение отношения объема пор к мякишу проводилось аналогом прибора Журавлева. Из средней части буханки хлеба, предварительно удалив корку, вращательными движениями цилиндра отбирались образцы объемом 27м<sup>3</sup>, полученные три выемки взвешивались. Далее проводилась обработка результатов.

Кислотность готового продукта определяли следующим образом: измельчали мякиш хлеба, не менее 25 г массой, доливали воду 250 см<sup>3</sup>, измельчали, перемешивали и взбалтывали в течение 2 минут, давали отстояться полученной взвеси, фильтровали. Титрование проводили раствором NaOH, в присутствии фенолфталеина, 3-4 капли, до устойчивой окраски бледно-розового цвета.

**Результаты.** При производстве хлеба контрольного и исследуемых образцов для приготовления опары проводили разведение дрожжей. В теплую воду добавляли дрожжи, соль, топинамбур порошком, в контрольном образце был добавлен сахар (табл. 1). После разведения дрожжей в будущую опару добавлялась часть муки для приготовления теста. Полученную массу перемешивали до однородного состояния в течение 7-12 минут. Давали опаре созреть при температуре 30°C. Созревшая опара давала увеличение объема в 2 раза, что свидетельствовало о её готовности.

Кислотность полуфабриката составила в среднем, у исследуемых образцов, – 2,5-3 град. В выбродившую

опару добавлялись остатки муки, воды, все тщательно перемешивалось. Полученное тесто отправлялось в расстоечный шкаф, где находилось на расстойке в течение 120-130 минут, через каждые 60 минут производилась обминка. После обминки тестовые

заготовки помещались в форму, где проходили дальнейшую расстойку. Выпечку пшеничного хлеба проводили в печи Восход 1500, с пароувлажнением при температуре 210-230°C. Продолжительность выпечки 50-60 минут.

Таблица 1 – Предлагаемая рецептура пшеничного хлеба

Ингредиенты	Сырье на 100 кг муки			
	Хлеб (контрольный образец)	Хлеб, порошок топинамбура (3%)	Хлеб, порошок топинамбура (5%)	Хлеб, порошок топинамбура (7%)
Мука пшеничная хлебопекарная первого сорта, кг	100	97	95	93
Порошок топинамбура, кг	-	3	5	7
Дрожжи хлебопекарные прессованные, кг	3	3	3	3
Соль пищевая, кг	1,5	1,5	1,5	1,5
Сахар – песок, кг	2	-	-	-
Вода, кг	60	60	60	60

Результаты полученных исследований других авторов в производстве хлебобулочных изделий с добавлением порошка топинамбура дают уверенность в продолжении данных разработок, так как повышенная пищевая ценность, возможность использования продукта для лечебно-профилактического питания обещают полученному функциональному изделию востребованность у потребителя.

Проведенные нами исследования органолептической оценки готового продукта показали, что визуальная оценка контрольного образца соответствовала 4,7 баллам. Равномерный цвет корки, правильная форма хлеба. Добавление 3% порошка топинамбура позволило продукту улучшить органолептические показатели. Цвет корки отличался насыщенностью. Форма хлеба была правильной, что позволило образцу получить оценку 5 баллов. Увеличение содержания порошка топинамбура в продукте способствовало снижению органолептических показателей. Цвет корки выглядел очень темным, почти горелым. Форма изделия соответствует хлебной форме, в которой проводилась выпечка, с несколько выпуклой хлебной коркой, без боковых выплывов. Вкусовые качества образца с добавлением муки топинамбура

3%, были наилучшими в сравнении с контролем и другими образцами. Хлеб имел очень нежный мякиш, равномерную пористость. Образцы с добавлением порошка топинамбура 5 и 7% по вкусовым качествам уступали первому образцу, у них при разжевывании ощущался вкус и запах, свойственный топинамбуру, что снизило оценку продукта до 4 баллов. Поверхность корки у всех исследуемых образцов была в пределах допустимых значений, но с увеличением содержания порошка топинамбура в продукте поверхность корки становилась идеальной, что указывает на улучшение структурно-механических показателей продукта. Цвет мякиша у всех образцов был одинаков, и не имел отличий в сравнении с контрольным образцом (рис. 1).

Влажность полученного продукта увеличивалась, по сравнению с контрольным образцом – 43%, по мере увеличения содержания порошка топинамбура в продукте и достигла максимального значения 43,4% (образец с порошком топинамбура (7%)). Кислотность исследуемых образцов изменилась незначительно с повышением показателей содержания порошка топинамбура. Контрольный образец имел кислотность 2,4 град, а образец с порошком топинамбура (7%) – 2,6 град (табл. 2).

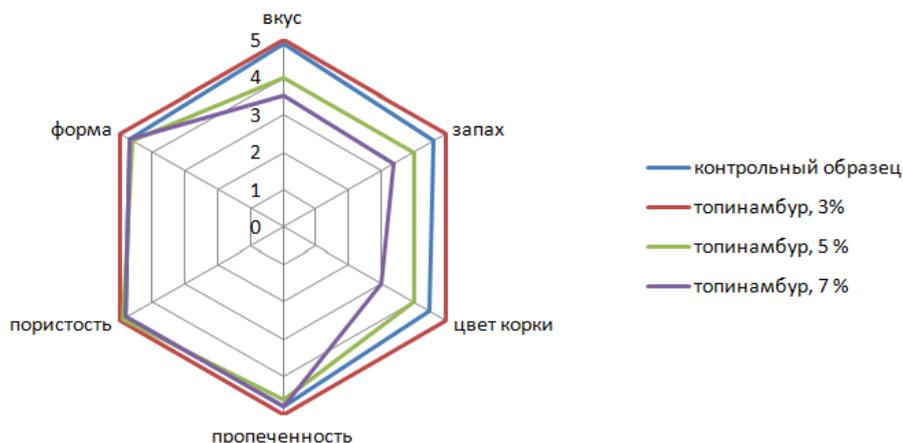


Рисунок 1 – Органолептический анализ исследуемых образцов

Таблица 2 – Качественные показатели образцов хлеба с использованием муки топинамбура

	Допустимые показатели по ГОСТ Р 58233-2018	Хлеб (контрольный образец)	Хлеб, порошок топинамбура (3%)	Хлеб, порошок топинамбура (5%)	Хлеб, порошок топинамбура (7%)
Влажность мякиша, %, не более	46	43	43,2	43,2	43,4
Кислотность мякиша, град., не более	3	2,4	2,4	2,4	2,6
Пористость мякиша, %, не менее	68	73,5	74,5	74	72,3

Пористость мякиша улучшилась на 1%, в сравнении с контрольным образцом – 73,5%, и составила 74,5%; имела равномерную, состоящую из мелких и средних по размеру пор. Был отмечен нежный мякиш, но с увеличением количества порошка в продукте наметилось снижение пористости и у образца с порошком топинамбура (7%), у которого был отмечен показатель 72,3%.

**Обсуждение.** Проанализировав полученные данные, можно с уверенностью сказать, что использование порошка топинамбура при производстве хлеба позволит увеличить ассортимент выпускаемой продукции хлебозаводов. Потребители получат функциональный продукт с высокими показателями качества.

Формирование крепкого клейковинного каркаса при использовании порошка топинамбура способствовало связыванию и удержанию воды в изделиях, в результате чего наблюдалось уменьшение упека и усушки, что, в свою очередь, привело к увеличению выхода хлеба [19, 20].

Добавленные в тесто хлебобулочных изделий хлопья из топинамбура обогащают его биологически активными веществами (фруктозой, витаминами, макро- и микроэлементами), являющимися питательной средой для дрожжей и молочнокислых бактерий, усиливая их активность и газообразование, что ускоряет процесс созревания теста. Кроме того, пищевые волокна хлопьев топинамбура (пектин и клетчатка) образуют дренажную систему для перераспределения образующегося углекислого газа (CO<sub>2</sub>), что улучшает структуру теста, из которого получают хлебобулочные изделия с большим объемом и равномерно-пористой структурой мякиша [10].

**Выводы.** Опираясь на наши исследования, мы предлагаем добавлять порошок топинамбура при замесе опары и разводке дрожжей, что позволит отказаться от использования сахара при производстве продукта, улучшит структурно-механические и органолептические показатели пшеничного хлеба.

Считаем, что является целесообразным при производстве пшеничного хлеба заменить 3% пшеничной муки порошком топинамбура.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Акулич А.В. Разработка компонентного состава сухих композитных смесей для заварных сортов хлеба улучшенной пищевой ценности / А.В. Акулич, Т.Д. Самуйленко, Р.Т.Тимакова // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2021 – № 4. – С. 158-171.
2. Агибалова В.С. Применение семян расторопши

пятнистой при разработке рецептуры хлеба повышенной пищевой ценности / В.С. Агибалова, И. В. Мажулина, В.И. Манжесов, Т.Н. Тертычная, Н.Н. Фоница // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2014. – №1-2. – С. 169-173.

3. Вершинина, О.Л. Инновационные технологии в хлебопечении / О.Л. Вершинина, Ю.Ф. Росляков, В.В. Гончар // Научные труды КубГТУ, 2015. – №2. – С. 15-25.

4. Васильев А.С. Формирование показателей качества пшеничного хлеба при добавлении порошка топинамбура / А.С. Васильев, Е.Н. Чумакова, Ю.Т. Фаринюк // Вестник КрасГАУ. – 2019. – № 5. – С.174-181.

5. Галиуллин, А.А. Использование биологически активных добавок в производстве мучных кондитерских изделий / Галиуллин А.А. // Сборник статей XIV Международной научно-практической конференции: «Агропромышленный комплекс: состояние, проблемы, перспективы», 2019. - С. 245-248.

6. Матюнина О.И. Современные подходы к созданию функциональных продуктов питания с использованием побочных продуктов молочного производства и растительного сырья / О.И. Матюнина, В.И. Манжесов, Е.Е. Курчаева // Международный студенческий научный вестник. – 2018. – № 3-2. – С. 254-257.

7. Тарасенко Н.А. Использование пищевых волокон в функциональных кондитерских изделиях / Н.А. Тарасенко, З.А. Баранова, Н.С. Быкова, Н.Р. Третьякова // Успехи современного естествознания. – 2016. – № 11-1. – С. 86-90.

8. Родичева, Н.В. Реологические аспекты технологий хлебобулочных изделий на основе овощных порошков / Н.В. Родичева, В.Я. Черных, О.А. Годунов, В.Г. Густинич // Сборник IV международной научно-практической конференции "Управление реологическими свойствами пищевых продуктов". – 2015. – С.61-67.

9. Timakova R., Efremova S., Zuparova V. Ways to improve the technological properties of commercial grain and ensure its preservation // AIP Conference Proceedings: International conference on food science and biotechnology. (FSAB 2021). – 2021. – Vol. 2419(1):020017. DOI:10.1063/5.0069615.

10. Курапов В.А. Использование топинамбура в пищевых продуктах / В.А.Курапов // Аллея науки, 2018. – 5 (21). – С. 53-58.

11. Жучкова М.А. Топинамбур - растение XXI века / М.А. Жучкова, С.Г. Скрипников // Овощи России, 2017. – №1 (34). – С31-33.

12. Гончар, В.В. Использование порошка из клубней топинамбура в технологии хлебобулочных и мучных кондитерских изделий / В. В. Гончар, О. Л. Вершинина, Ю. Ф. Росляков // Хлебопродукты. – 2013. – №10. – С. 46.

13. Варламова, Е.Н. Производство пшеничного хлеба с использованием муки льна / Е.Н. Варламова. // Сборник статей VIII Международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию юбилею А.Н. Кшникаткиной, доктора сельскохозяйственных наук, профессора, Заслуженного работника сельского хозяйства РФ. «Инновационные технологии в АПК: теория и практика», 2020. – С. 198-199.

14. Зуева, Е.А. Влияние гречневой муки на качество пшенично-ржаного хлеба / Е.А. Зуева // Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 180-летию ФГБОУ ВО "Донского государственного аграрного университета": Инновационные технологии пищевых производств, 2020. - С. 52-55.

15. Курочкин, А.А. Технологические решения в производстве булочных изделий с повышенной пищевой ценностью / Курочкин А.А., Шматкова Н.Н., Шабурова Г.В. //

Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология, 2016. – Т. 6. – № 4 (19). – С. 149-155.

16. Лисовой В.В., Купин Г.А., Казимирова М.А., Лукьяненко М.В., Викторова Е.П. Исследование химического состава и свойств пищевой добавки из топинамбура// Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания – 2016 – С.86-89.

17. Росляков, Ю.Ф. Продукты переработки клубней топинамбура – перспективное сырье в производстве мучных кондитерских изделий / Ю.Ф. Росляков, В.В. Гончар, О.Л. Вершинин // Кондитерские изделия XXI века : мат. 9 Международной конф. – М. : Пищепромиздат, 2013. – 320 с.

18. Рябова, В.Ф. Пищевая добавка из топинамбура для производства хлебобулочных изделий с лечебно-профилактическими свойствами/В.Ф.Рябова, С.Ш.Латыпова, Е.Е.Ходакова, Д.Э.Миллер. – Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2015. – № 23 (103). – С. 217-219.

19. Питюрина И.С. Совершенствование технологии производства пшеничного хлеба функционального назначения / И.С. Питюрина, М.В. Евсенина, Е.И. Лупова, С.В. Никитов // Вестник КрасГАУ, 2019. – №5 (146). – С. 82-189.

20. Акулич А.В. Разработка компонентного состава сухих композитных смесей для заварных сортов хлеба улучшенной пищевой ценности/ А.В. Акулич, Т.Д. Самуйленко, Р.Т.Тимакова//Хранение и переработка сельхозсырья. – 2021. – № 4. – С. 158-171.

*Статья поступила в редакцию 10.08.2022*

*Статья принята к публикации 16.09.2022*

УДК 614.844.2

DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0021

**ОСНАЩЕНИЕ СТАПЕЛЬНЫХ МЕСТ СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ ЭЛЛИНГОВ СИСТЕМАМИ  
ПОЖАРОТУШЕНИЯ. ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ РЕШЕНИЯ**

© Автор(ы) 2022

SPIN: 8788-4699

AuthorID: 1152756

ORCID: 0000-0003-3417-3519

**ЛЫТКИН Александр Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры океанотехники и энергетических установок*Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова  
(163002, Россия, г. Архангельск, набережная Северной Двины, д. 17, e-mail: lytkin.a.c@gmail.com)*

SPIN: 3089-690

AuthorID: 828751

ORCID: 0000-0002-5501-6232

**ВОЙТЕНОК Олег Викторович**, кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры специальной подготовки*Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России  
(196105, Санкт-Петербург, Московский пр. д.149, e-mail: vogps@mail.ru)*

SPIN: 6368-3183

AuthorID: 1152083

**ЕВГЕНОВ Вадим Николаевич**, начальник сектора*Научно-исследовательское проектно-технологическое бюро «Онега»  
(164509, Россия, Архангельская обл., г. Северодвинск, проезд Машиностроителей, д. 12,  
e-mail: evgenov@onegastar.ru)*

**Аннотация.** Обеспечение пожарной безопасности объектов судостроительной отрасли является актуальным вопросом. Крупные пожары на строящихся и ремонтируемых объектах приносят не только колоссальный ущерб, но и фактически срывают сроки строительства и ввода в эксплуатацию судов, что, в свою очередь, если судно строится для военно-морского флота Российской Федерации, является элементом влияния на обороноспособность Российской Федерации. В работе рассмотрены способы повышения пожарной безопасности на стапельных местах судостроительных предприятий. Фактически весь процесс строительства судна на стапеле сопровождается проведением пожароопасных работ (огневых, огнеопасных и взрывоопасных). Основное направление в реализации вопросов обеспечения пожарной безопасности заключается в предотвращении пожара и быстрой его локализации за счет применения огнетушащих средств (веществ), доступных для направления в очаг пожара в первый момент времени после его возникновения. Применение автоматизированных установок пожаротушения позволяет обеспечить тушение пожаров на действующих судах, однако существующая нормативно-правовая база не отражает в полной степени требования к проектированию и монтажу систем пожаротушения строящихся судов на стапельных местах. Целью исследования является совершенствование подходов в нормативном регулировании вопросов применения систем пожаротушения на строящихся судах. Реализация предложений, содержащихся в статье, позволит увязать требования и обеспечить повышение пожарной безопасности строящихся судов на стапельных местах судостроительных и судоремонтных эллингов.

**Ключевые слова:** строительство судов, пожарная безопасность, системы пожаротушения, стапели, нормативное регулирование.

**EQUIPPING OF SLIPWAYS OF SHIPBUILDING BOATHOUSES WITH FIRE EXTINGUISHING  
SYSTEMS. PROBLEMS AND SOLUTIONS**

© The Author(s) 2022

**LYTKIN Alexander Sergeevich**, candidate of technical sciences, associate professor,  
associate professor of the Department of Ocean Engineering and Power Plants  
*Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education**Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov  
(163002, Russia, Arkhangelsk, Severnaya Dvina Embankment, 17, e-mail: lytkin.a.c@gmail.com)***VOITENOK Oleg Viktorovich**, candidate of technical sciences, associate professor,  
associate professor of the Department of Special Training*Saint-Petersburg University of state fire service of EMERCOM of Russia  
(196105, St. Petersburg, Moskovsky Ave., 149, e-mail: vogps@mail.ru)***EVGENOV Vadim Nikolaevich**, head of Sector  
*Research Design and Technology Bureau «Onega»*

(164509, Russia, Arkhangelsk region, Severodvinsk, passage of Machine Builders, 12, e-mail: evgenov@onegastar.ru)

**Abstract.** Ensuring fire safety of shipbuilding industry facilities is an urgent issue. Large fires at facilities under construction and under repair not only cause enormous damage, but also actually disrupt the construction and commissioning of ships, which, in turn, if a ship is being built for the Navy of the Russian Federation, is an element of influence on the defense capability of the Russian Federation. The paper considers ways to improve fire safety at the slipways of shipbuilding enterprises. In fact, the entire process of building a ship on the slipway is accompanied by fire-hazardous work (fire, flammable and explosive). The main direction in the implementation of fire safety issues is the prevention of fire and its rapid localization through the use of extinguishing agents (substances) available for referral to the fire at the first moment after its occurrence. The use of automated fire extinguishing systems makes it possible to extinguish fires on existing ships, however, the existing regulatory framework does not fully reflect the requirements for the design and installation of fire extinguishing systems for ships under construction on the slipways. The purpose of the study is to improve approaches in the regulatory regulation of the use of fire extinguishing systems on ships under construction. The implementation of the proposals contained in the article will make it possible to link the requirements and ensure an increase in fire safety of ships under construction at the slipways of shipbuilding and ship repair boathouses.

**Keywords:** ship construction, fire safety, fire extinguishing systems, slipways, regulatory regulation.

*Для цитирования:* Лыткин А.С. Оснащение стапельных мест судостроительных эллингов системами пожаротушения. Проблемы и пути решения / А.С. Лыткин, О.В. Войтенко, В.Н. Евгенов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022. – Т. 11. – № 3(59). – С. 141-146. – DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0021.

**Введение.** Эффективная концепция противопожарной защиты сокращает риск возникновения пожара и позволяет минимизировать возможный ущерб от него, а также, насколько это возможно, косвенные убытки. Существуют различные мнения по возможности реализации данной концепции, которые могут быть подтверждены при детальном рассмотрении структуры и эффективности концепции противопожарной защиты или анализе рисков, которые необходимо минимизировать, применительно к конкретному объекту защиты. Как правило, это может быть реализовано при применении локальных систем пожаротушения.

Обеспечение пожарной безопасности является одной из важнейших функций нашего государства [1]. В целях обеспечения защищенности жизни и здоровья работников, имущества, общества и государства от пожаров на объектах судостроительных и судоремонтных предприятий, независимо от их ведомственной принадлежности, реализуется исполнение нормативных требований пожарной безопасности, установленных к таким объектам. Методов оценки пожарного риска для таких объектов защиты, как морские и речные объекты на этапе их строительства и ремонта, в настоящее время в нормативно-правовой базе по пожарной безопасности Российской Федерации нет.

**Методология.** Основной целью исследования является совершенствование подходов в нормативном регулировании вопросов применения систем пожаротушения на строящихся судах.

В рамках исследования применялись эмпирические и теоретические методы исследования, заключающиеся в наблюдении процессов строительства судов на стапелях и проведения пожароопасных работ (огневых, огнеопасных и взрывоопасных), анализе нормативных правовых актов и существующих нормативных документов, содержащих требования к обеспечению пожарной

безопасности строящихся судов, применения элементов моделирования систем пожаротушения на стапелях для строящихся судов.

Согласно Техническому регламенту [2] на каждом объекте морского транспорта с целью обеспечения безопасности людей при пожаре и защиты имущества от воздействия опасных факторов пожара необходимо предусмотреть систему обеспечения пожарной безопасности, которая должна выполнять задачи по исключению возможности возникновения пожара, обеспечению пожарной безопасности людей и обеспечению пожарной безопасности материальных ценностей одновременно.

Проектировщики и строители объектов морского транспорта с учётом положений [2] обеспечивают выполнение требований к пожарной безопасности, установленным к таким объектам [3].

**Результаты.** Одним из способов защиты от воздействия опасных факторов пожара и (или) ограничения последствий их воздействия на производственные объекты в судостроении и судоремонте (рис. 1) является применение систем и средств противопожарной защиты. Основными такими средствами являются временные системы обеспечения строительства (ремонта) судов – системы ТОС. Такие системы проектируются индивидуально под конкретный проект судна.

Следует различить, что будет относиться к временным системам обеспечения строительства (ремонта) судна, а что к системам противопожарной защиты судостроительного эллинга. Так, к системам технического обеспечения судов (ТОС) будут относиться «специализированные системы, оборудование и механизмы, прокладываемые от пункта подключения вне судна до потребителя на судне. Такие системы обеспечивают снабжение технологических и штатных потребителей на судне всеми видами энергии и средами требуемых параметров для выполнения технологических

операций по строительству и созданию безопасных условий труда на построечных местах» [4]. Системы противопожарной защиты, входящие в состав судостроительного эллинга – это системы, которые предусмотрены проектной документацией к эллингу.

Такие системы могут быть применены для решения задач по обеспечению пожарной безопасности строительства или ремонта кораблей, но чаще служат опорной точкой подключения к технологическим средам для временных систем ТОС (рис. 2).



Рисунок 1 – Станционное место судостроительного предприятия

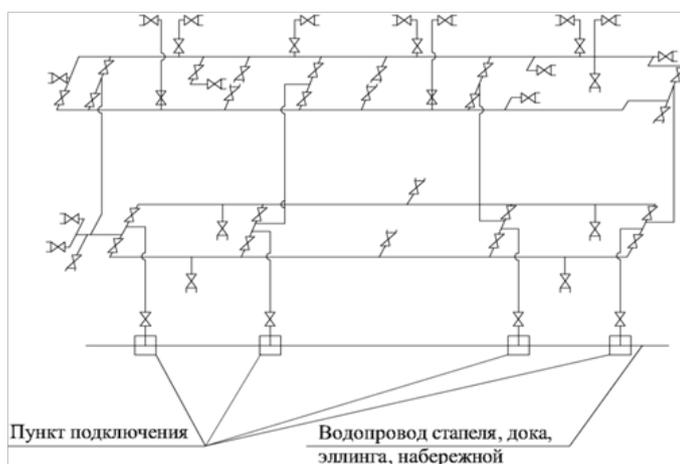


Рисунок 2 – Схема системы водяного пожаротушения систем технического обеспечения строящихся, ремонтируемых и переоборудуемых судов (ТОС) с двумя кольцевыми магистральями для строительства или ремонта судов водоизмещением более 10000 т

Как правило, если не установлены специальные требования, учитывающие характер пожарной нагрузки, в случае возникновения пожара на судне, требуется значительное количество огнетушащих веществ (ОТВ), таких как вода и пенные растворы в заданных концентрациях. Указанные условия к наличию достаточного количества ОТВ может выполнить только стационарная установка пожаротушения, размещенная в эллинге. А, следовательно, без стационарных систем пожаротушения при строительстве кораблей и судов не обойтись. Указанное, подтверждают факты пожаров и аварий при строительстве (ремонте) кораблей и судов при которых использовались такие системы. Отмеченные случаи освещены средствами массовой информации:

1. Пожар на корвете «Проворный» на заводе «Северная верфь» в Санкт-Петербурге, 17 декабря 2021 года;

2. Пожар на авианесущем крейсере «Адмирал Кузнецов» 12 декабря 2019 года в г. Мурманске при проведении сварочных работ;

3. Пожар на АПЛ «Орёл» в АО «ЦС «Звёздочка» 7 апреля 2015 года в результате сварочных работ в районе 9-го отсека;

4. Пожар на АПЛ «Екатеринбург» 29 декабря 2011 года, в 82-м судоремонтном заводе в пгт. Росляково, а также ряд других случаев.

**Обсуждение.** При рассмотрении вопроса о защите от пожаров продукции и изделий судостроительных и судоремонтных предприятий (морские и речные объекты на разных этапах жизненного цикла), наряду с нормативными правовыми актами и документами Российской Федерации, содержащими требования пожарной безопасности [5, 6], должны соблюдаться требования отраслевых (ведомственных) документов, в том числе стандартов судостроительных (ремонтных) организаций, если таковые имеются и зарегистрированы в качестве нормативных документов.

Одним из корпоративных стандартов, содержащим требования пожарной безопасности для судостроительной и судоремонтной отрасли промыш-

ленности, является СТО ОСК. КСМК 12.003-2019 [7]. СТО ОСК. КСМК 12.003-2019 (далее по тексту – Стандарт) является нормативным документом, устанавливающим требования пожарной безопасности к противопожарному режиму и техническим средствам организаций, направленных на обеспечение защиты по пожарной безопасности и предотвращения пожара при строительстве и ремонте кораблей и судов, принадлежащим предприятиям Минпромторга России. Указанный стандарт согласован с МЧС России письмом зам. директора департамента надзорной деятельности и профилактической работы А.А. Макеевым от 01.08.2019 № 19-2-4-2981. Отметим, что Стандарт внедрён в систему менеджмента качества обществ группы объединенной судостроительной корпорации (ОСК) в 2020 году.

В соответствии с пунктом 7.6.1.2 [7] построены позиции судостроительных и судоремонтных предприятий должны быть оборудованы неавтоматическими или полуавтоматическими стационарными системами пожаротушения. В Стандарте приводятся принципиальные схемы системы водяного и пенного пожаротушения (приложения X и Ц), однако последние, могут быть взяты за основу только при проектировании временных систем ТОС для обеспечения строительства самих строящихся и ремонтируемых морских и речных объектов. Ввиду отличительных особенностей проектирования систем пожаротушения и системам технического обеспечения строящихся, ремонтируемых и переоборудуемых судов (ТОС) по принципу обеспечения защиты объекта «корабль» / «док», указанные в приложении «X» (рис. 2) и «Ц» [7] требования не применимы к оснащению стапельных мест судостроительных и судоремонтных эллингов системами пожаротушения. Для систем пожаротушения стапельных мест в судостроительных (ремонтных) доках в стандарте [7] отсутствуют нормативные требования.

С учётом состояния дел по выполнению требований пожарной безопасности на стапельных местах, в случае необходимости проверки соблюдения проектных решений средств обеспечения противопожарной защиты стапельных мест, в настоящее время необходимо обращаться к проектной документации конкретного судостроительного эллинга, а также положениям ГОСТ 12.4.009-83 [8]. А в случае проектирования новых систем или реконструкции (модернизации, технического перевооружения) существующих систем противопожарной защиты стапельных мест – выполнять действующие требования, установленные нормативными документами и нормативными правовыми актами по пожарной безопасности к системам пожаротушения [4].

Результаты поиска требований к неавтоматическим или полуавтоматическим стационарными системами пожаротушения, подтверждающих выполнение положений Федерального закона от 22.07.2008 № 123-ФЗ [9] и Федерального закона от 30 декабря

2009 года № 384-ФЗ [10] свидетельствуют, что таковые отсутствуют.

СП 485.1311500.2020 [11], выполненный с учётом положений ГОСТ Р50680-94 «Установки водяного пожаротушения автоматические. Общие технические требования. Методы испытаний» [12] и ГОСТ Р50800-95 «Установки пенного пожаротушения автоматические. Общие технические требования. Методы испытаний» [13] также имеют распространение на вновь проектируемые и модернизируемые автоматические установки (системы) водяного пожаротушения (далее – установки), предназначенные для локализации или тушения и ликвидации пожара и одновременно выполняющие функции автоматической пожарной сигнализации. 2020-2021 годы ознаменованы значительными изменениями законодательства в области пожарной безопасности в рамках «регуляторной гильотины» [14, 15].

В виде факторов производственной деятельности при строительстве и ремонте «стандартно» массово присутствуют пламя и искры от проведения газосварочных работ, а помещения и объёмы таких объектов задымлены и запылены. Высокими также являются уровни шума и вибрации от работы различных вентиляционных агрегатов и электрических силовых машин, применяемых для обеспечения выполнения работ. По этой причине и в связи со спецификой организации и проведения технологических процессов по строительству и ремонту кораблей и судов, применение автоматических средств противопожарной защиты стапельных мест будет сопряжено с массовыми случаями ложного запуска таких систем, что сделает невозможным выполнение строительства и ремонта морских и речных объектов, а в ряде случаев без оперативного управления приведёт к порче материального имущества судна, а также возможной гибели персонала, находящегося внутри помещений судна, при выходе ОТВ.

На сегодняшний день вопрос оснащения стапельных мест устойчивыми к ложным запускам по причине массово присутствующих производственных факторов (пламя, искры, пыль, вибрация и др.) системами автоматической противопожарной защиты является не решённым. На рынке противопожарного оборудования существуют системы внешнего пожаротушения контейнерного исполнения, которые могут быть смонтированы на стапельных местах [16], однако данные системы не могут обеспечить тушение пожара внутри строящегося судна.

Еще одним не маловажным нормативным упущением является факт отсутствия в отраслевом стандарте ОСТ5Р.0718-2003 «Техническое обеспечение строящихся, ремонтируемых и переоборудованных судов. Общие требования» нормы, определяющей необходимость оборудования подводных лодок и глубоководных аппаратов временными системами пенотушения (пенные системы ТОС, согласно приложению «А» [17]). Подводные лодки

и глубоководные аппараты являются наиболее сложными инженерными сооружениями, как в техническом аспекте, так и с точки зрения обеспечения безопасности технологических процессов их производств (ремонта, утилизации). Наличие прочного корпуса в сочетании с легким корпусом, является важнейшей особенностью, отличающей подводные лодки от всех других кораблей. Эта особенность расширяет количество замкнутых объёмов (в сравнении с надводными кораблями), и соответственно затрудняет способ доставки огнетушащих веществ к очагу пожара в случае его возникновения.

Немаловажным будет отметить, как обстоит ситуация с решением подобного вопроса за рубежом [18, 19, 20]. К примеру, согласно Директива Европейского парламента и Совета 2009/104/ЕС от 16.09.2009 [21] там, где невозможно полностью обеспечить использование рабочего оборудования без риска для безопасности и здоровья работников, необходимо принять надлежащие меры по минимизации этих рисков.

Одним из ключевых элементов противопожарной защиты на английском промышленном предприятии (таком, как судостроительный эллинг) является применение в производственном цикле безопасного технологического оборудования – такого оборудования которое в результате его нормальной работы не приносило бы ущерба ни личности, ни имуществу. Условие безопасности, отмеченное выше, включено в общую систему противопожарной защиты эллинга. При этом отмечается, что оценка риска возникновения пожароопасной ситуации выполнена быть не может по причине меняющегося во времени процесса осуществления технологического цикла строительства или ремонта судна. По этой причине оценка риска может быть рассмотрена только в составе общей системы обеспечения противопожарной защиты стапельного места эллинга. Управление системой возложено на дежурный персонал. Например, выход огнетушащего вещества на смонтированное на судне оборудование может привести его к порче. Поэтому главенствующую роль над процессами подачи ОТВ в помещения судна должен иметь оператор, который управляет установкой тушения с учётом рисков распространения и наличия персонала на судне [18, 19].

Однако, в общем правиле на английском судостроительном предприятии любой прямой ущерб и потери в связи с остановкой производственного процесса не должен быть выше установленного значения. Входящее в состав поточной линии оборудование учитывается в сценариях развития возможного пожара на судне, так же, как и его воздействие на материальные средства вблизи него (например, внутренние танки и объёмы уравнильных и дифференциальных цистерн строящихся судов) [18, 19].

На примере Регистра Судоходства Ллойда (Англия) (Lloyd's Register of Shipping) требования по противопожарной защите владельца судна

могут быть даже более строгими, чем установлены государственными органами. Это относится и к порядку проведения пожароопасных работ. Любое несоблюдение требований и норм может привести владельца предприятия к ответственности. В некоторых сферах промышленности, например в английской издательской деятельности, получить страховой полис от потерь, связанных с остановкой производственного процесса по причине ущерба от опасных факторов пожара, почти невозможно (за исключением убытков от прямого ущерба) [19, 20].

Воздействие опасных факторов пожара на производственное оборудование, применяемое в процессе постройки или ремонта судов, может вывести его из строя. Такое оборудование не может быть заменено оперативно. Это указывает на то, что в результате пожара неизбежны финансовые издержки, вплоть до потери доли рынка предприятием. Для высокоуровневой противопожарной защиты концепция защиты эллинга и стапельного места должна минимизировать риск возникновения пожара при строительстве судна и обеспечивать защиту всех помещений и мест проведения работ по строительству морского объекта [18, 20].

Противопожарная защита достаточно часто достигается реализацией «системы локального пожаротушения», которая, прежде всего, связана с защитой производственных мощностей. Наиболее распространёнными системами на предприятиях, аккредитованных Регистром Судоходства Ллойда (Англия) являются водяные системы, системы с подачей воды с растворами смачивателей и системы пожаротушения с выходом углекислого газа.

Подтвердим, что в настоящее время на отечественных судостроительных предприятиях безопасным средством ликвидации пожаров в замкнутых и труднодоступных помещениях подводных лодок и глубоководных аппаратов является объёмное тушение воздушно-механической пеной. Наиболее простым вариантом обеспечения противопожарной защиты кораблей и судов на стапельных местах является оснащение построечных позиций автоматическими установками пожаротушения и перевод их в ручной режим управления с возможностью подключения к штатным систем дока. Однако, маловероятно, что это будет экономически целесообразно ввиду сложности управления и настройки алгоритмов функционирования автоматических систем пожаротушения в сравнении с аналогичными по производительности, неавтоматическими. С учётом изложенного, можно сделать вывод, что простого решения вышеотмеченных проблемных вопросов нет. А следовательно, решать такие проблемы необходимо с проектировщиками автоматических установок пожаротушения, а также специалистами, которые знают и понимают специфику деятельности судостроительных и ремонтных организаций.

**Выводы.** По результатам анализа существующих проблем по оснащению стапельных мест

судостроительных эллингов системами пожаротушения полагаем целесообразным наметить основные пути их решения:

1. На основе существующих требований и специфики судостроительного производства разработать стандарт организации (на примере действующего в крупнейшей судостроительной корпорации России – АО «ОСК» СТО ОСК.КСМК.12.003-2019), определяющий нормы и правила проектирования неавтоматических и полуавтоматических систем пожаротушения на стапельных местах эллингов судостроительных организаций.

2. Разработать и внедрить нормативный документ (стандарт) по пожарной безопасности, подтверждающий требования Федерального закона «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности», в обеспечение легитимности стандарта организации (группы объединенной судостроительной корпорации), определяющего нормы и правила проектирования неавтоматических и полуавтоматических систем пожаротушения на стапельных местах эллингов судостроительных организаций.

3. Внести изменения в ОСТ5Р.0718-2003 и определить норму, определяющую необходимость наличия систем пенного пожаротушения при строительстве, ремонте и утилизации атомных, дизель-электрических подводных лодок и глубоководных аппаратов.

Реализация предложений, содержащихся в статье, позволит увязать требования и обеспечить повышение пожарной безопасности строящихся судов на стапельных местах судостроительных и судоремонтных эллингов. Цель исследования достигнута.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. О пожарной безопасности: Федер. закон Рос. Федерации от 21 декабря 1994 года № 69-ФЗ. Доступ из информ.- правового портала «КонсультантПлюс».
2. Об утверждении технического регламента о безопасности объектов морского транспорта: Пост. Правительства Рос. Федерации от 12 августа 2010 года № 620. Доступ из информ.- правового портала «КонсультантПлюс».
3. Гремин Ю.В., Любимов Е.В., Сытдыков М.Р. Особенности пожарной опасности материалов и сред, применяемых при постройке и ремонте судов. Научно-аналитический журнал «Проблемы управления рисками в техносфере», 2010. № 4 (16). - С. 16-21.
4. Пожарная безопасность в организациях судостроительной промышленности при строительстве и ремонте морских (речных) объектов: учебное пособие / А.С. Лыткин, Е.В. Любимов, Н.Ю. Едуш; Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М. В. Ломоносова. – Архангельск: САФУ, 2016. – 121 с.
5. Евгенов В.Н., Добровенко С.В., Лыткин А.С. Проблемы и пути повышения пожарной безопасности при строительстве, ремонте и переоборудовании кораблей и судов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. - 2018. - №52/53. - С. 23-27.
6. Попов С.В., Габриэлян С.Г. Актуализация нормативной документации по пожарной безопасности при строительстве и ремонте судов. Научно-технический журнал «Пожарная безопасность», 2018. № 4. - С.18-21.
7. СТО ОСК.КСМК.12.003-2019 «Правила пожарной безопасности на строящихся, ремонтируемых и переоборудуемых кораблях и судах. Общие технические

требования. Часть 1» // URL: [http://s16571.vh.co.ru/documents/ \(дата обращения 26.04.2022\).](http://s16571.vh.co.ru/documents/ (дата обращения 26.04.2022).)

8. ГОСТ 12.4.009-83. Межгосударственный стандарт. Пожарная техника для защиты объектов. Основные виды. Размещение и обслуживание. (утв. Постановлением Госстандарта СССР от 10.10.1983 № 4882) // М.: ИПК Издательство стандартов, 2001.

9. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: Федер. закон Рос. Федерации от 22.07.2008 № 123-ФЗ. Доступ из информ.- правового портала «КонсультантПлюс».

10. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений: Федер. закон Рос. Федерации от 30 декабря 2009 года № 384-ФЗ. Доступ из информ.- правового портала «КонсультантПлюс».

11. Об утверждении свода правил «Системы противопожарной защиты. Установки пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования» (вместе с «СП 485.1311500.2020. Свод правил. Системы противопожарной защиты. Установки пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования»): Приказ МЧС России от 31.08.2020 № 628. Доступ из информ.- правового портала «КонсультантПлюс».

12. ГОСТ Р 50680-94 «Установки водяного пожаротушения автоматические. Общие технические требования. Методы испытаний» // М.: Издательство стандартов, 1994.

13. ГОСТ Р 50800-95 «Установки пенного пожаротушения автоматические. Общие технические требования. Методы испытаний» // М.: ИПК Издательство стандартов, 1995.

14. Войтенко О.В. Некоторые вопросы обеспечения пожарной безопасности объектов защиты с учетом новых требований. Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы. Мониторинг, предотвращение и ликвидация чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера: Материалы международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 28 октября 2021 года / Сост.: А.В. Зыков, Н.В. Федорова. – СПб.: ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2021. – С.7-13.

15. Войтенко О.В., Шкитронов М.Е., Марков И.С. Обеспечение пожарной безопасности объектов защиты с учетом изменения законодательства в рамках «регуляторной гильотины» Актуальные проблемы и инновации в обеспечении безопасности : сборник материалов Дней науки с между-народным участием (6–10 декабря 2021 г.) / ред. колл. А. Ю. Акулов, О. Ю. Деченко, О. В. Беззапонная [и др.]. – Екатеринбург : Уральский институт ГПС МЧС России, 2022. Ч. 1. – 2022. – С.71-74.

16. Система внешнего пожаротушения контейнерного исполнения. URL: <https://runitor.ru/products/sistema-vneshnego-pozharotusheniya-kontejnernogo-ispolneniya-kit/> (дата обращения 24.03.2022).

17. ОСТ5Р.0718-2003 «Техническое обеспечение строящихся, ремонтируемых и переоборудованных судов. Общие требования»// URL: [http://s16571.vh.co.ru/documents/ \(дата обращения 26.04.2022\).](http://s16571.vh.co.ru/documents/ (дата обращения 26.04.2022).)

18. Thomas G. O. On the conditions required for explosion mitigation by water sprays // Process Safety and Environmental Protection.—2000.—Vol. 78, Issue 5.—P. 339-354. DOI: 10.1205/095758200530862.

19. Segal C., Chandy A., Mikolaitis D. Breakup of droplets under shock impact // Combustion Processes in Propulsion. Control, Noise and Pulse Detonation / Roy G. D. (ed.). — Oxford : Elsevier Butterworth- Heinemann, 2006. — P. 241-288. DOI: 10.1016/b978-012369394-5/50034-2.

20. Freeman G. A. Sailors to the end: the deadlyfire on the USSForrestal and the heroes who fought it. HarperCollins, 2004. 206 p.

21. Директива Европейского парламента и Совета 2009/104/ЕС от 16.09.2009 «О минимуме требований к безопасности и гигиене труда при использовании рабочего оборудования работниками» URL: [http://test.safe-work.ru/Bibl/BibOT/MOT/m891130\\_655eec2009.html](http://test.safe-work.ru/Bibl/BibOT/MOT/m891130_655eec2009.html) (дата обращения 27.04.2022).

Статья поступила в редакцию 30.05.2022

Статья принята к публикации 16.09.2022

УДК 614.849:538.9

DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0022

**КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ МЕХАНИЗМ УПРАВЛЕНИЯ СВОЙСТВАМИ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ СИСТЕМ ПРИ НАНОМОДИФИЦИРОВАНИИ ОГНЕТУШАЩИХ И ОГНЕЗАЩИТНЫХ СОСТАВОВ**

© Автор 2022

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 Государственной противопожарной службы*  
(196105, Россия, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149, e-mail: ivanov.av@igps.ru)

**Аннотация.** Одним из перспективных направлений повышения эффективности систем противопожарной защиты промышленных предприятий является применение технологий наномодифицирования жидкостей, входящих в основу огнетушащих и огнезащитных составов. Обозначены основные проблемы создания и применения наножидкостей в качестве основного компонента для водосодержащих огнетушащих составов и жидкой фазы компонентов вспучивающихся огнезащитных составов. В работе приведены данные лазерной корреляционной спектроскопии, атомно-силовой микроскопии, результаты измерений поверхностного натяжения и объемного электрического сопротивления наножидкостей для обоснования возможности применения способа модификации базовых жидкостей с помощью углеродных наноструктур в сочетании с электрофизическим воздействием. Показано, что наночастицы являются дополнительными центрами кластерообразования, а при электрофизическом воздействии происходит образование кластеров с меньшими размерами в сравнении с немодифицированными жидкостями. Дано теоретическое обоснование механизма наномодифицирования огнетушащих и защитных составов, который основывается на применении электрофизического воздействия в объеме жидкостей и на границе раздела фаз «жидкость-твердая частица» и «жидкость-жидкость», обеспечивающего необходимые характеристики материалов на стадиях их подготовки и применения.

**Ключевые слова:** наножидкость, углеродные наноструктуры, кластеры, электрофизическое воздействие, самоорганизация, пожаротушение, огнезащита.

**NANOMODIFICATION OF FIRE-EXTINGUISHING AND PROTECTIVE COMPOSITIONS:  
CONCEPTUAL SUBSTANTIATIONS MECHANISM OF PROPERTY  
CONTROL IN TWO-COMPONENT SYSTEMS**

© The Author 2022

**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 technologies of nanomodification of base liquids, which are the basis of materials, are one of the promising directions for improving the performance of fire extinguishing compositions and intumescent fire retardant materials. The main problems of the creation and application of nanofluids as the main component for water-containing fire extinguishing compositions and the liquid phase of the components of intumescent fire retardant compositions are outlined. The article presents the data of laser correlation spectroscopy, atomic force microscopy, the results of measurements of surface tension and volumetric electrical resistance of nanofluids to justify the possibility of using the method of modifying base fluids using carbon nanostructures in combination with electrophysical action. It is shown that nanoparticles are additional centers of cluster formation, and under electrophysical action, clusters with smaller sizes are formed in comparison with unmodified liquids. The conceptual mechanism of nanomodification is based on the application of electrophysical action in the substance and at the interface between the phases "liquid-solid particle" and "liquid-liquid". This increases the stability of nanofluids and provides the necessary characteristics of materials at the stages of their preparation and application.

**Keywords:** nanofluid, carbon nanostructures, clusters, electrophysical action, self-organization, fire extinguishing, fire protection.

**Для цитирования:** Иванов А.В. Концептуальный механизм управления свойствами двухкомпонентных систем при наномодифицировании огнетушащих и огнезащитных составов / А.В. Иванов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022. – Т. 11. – № 3(59). – С. 147-153. – DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0022.

**Введение.** Основными целевыми показателями в повышении эффективности систем противопожарной защиты промышленных предприятий являются увеличение огнетушащей способности установок пожаротушения, улучшение технических средств их применения, а также повышение огнезащитной эффективности составов [1]. Многокомпонентные огнетушащие жидкости (далее – ОТВ) (растворы пенообразователей, гидрогели и др.), а также огнезащитные составы (далее – ОС), содержащие в своей структуре растворители, наполнители, вспучивающиеся компоненты, антипирены и другие компоненты, представляют собой коллоидные системы и дисперсии [2, 3]. Диспергирование углеродных наноструктур (УНС) в концентрациях до 1-5 об. % в базовые жидкости позволяет изменить их физические свойства и улучшить эксплуатационные характеристики конечного продукта [4]. При модифицировании базовых жидкостей углеродными наноструктурами наблюдалось увеличение удельной теплоты парообразования [5, 6] и снижение интенсивности испарения наножидкостей [9]. Результаты, изложенные в работах [5-8], позволяют сделать выводы о возможности применения наномодифицированных жидкостей в системах противопожарной защиты. Однако до настоящего времени применение технологий наномодифицирования ОТВ и ОС не нашло широкого применения ввиду целого ряда ограничений, таких как относительная дороговизна модификаторов, сложность их введения в базовую жидкость, а также невозможность длительного сохранения свойств наножидкостей [10].

Улучшение эксплуатационных характеристик модифицированных веществ и материалов, обусловленные явлениями переноса между взаимодействующими молекулярными и ван-дер-ваальсовыми кластерами [11], наблюдаются при размерах наноструктур порядка 10-100 нм и сильно зависят от их стабильности в базовом веществе [12]. Стабильность наноструктур, обеспечивающее сохранение свойств ОТВ и ОС, возможно обеспечить при использовании поверхностно-активных веществ (ПАВ), либо электростатической функционализации [5, 13]. Результаты исследований влияния переменных электрических полей на физико-химические свойства жидкостей позволили выдвинуть предположение о возможности управления адгезионными и когезионными взаимодействиями, за счет изменения надмолекулярной структуры вещества, что, в свою очередь, может обеспечить изменение свойств ОТВ и ОС [14].

Целью работы было исследование структуры наножидкостей на основе воды и этанола, а также обоснование возможности применения отдельных аллотропных форм углеродных наночастиц, в сочетании с электрофизическим механизмом стабилизации наноструктур, при получении ОТВ и компонентов ОС.

**Методология.** В качестве модельных жидкостей

были использованы вода, являющаяся основным компонентом жидких ОТВ, а также этанол, как наиболее известный представитель класса спиртов, являющихся пожароопасными жидкостями и применяющимися в качестве растворителей для лакокрасочных материалов. Наножидкости были получены путем диспергирования с помощью источника ультразвука (частота 22 кГц, мощность 2,5 кВт, время воздействия 10 мин.) углеродных наночастиц (УНС): многослойных углеродных нанотрубок (MWCNT), тороидальных наночастиц – астраленов (*Astr*). Ряд образцов подвергался воздействию переменного электрического поля (электрофизическое воздействие) напряженностью 1,5-2,0 кВ/м и частотой 50 Гц [15].

В исследовании применялись методы: лазерной корреляционной спектроскопии (ЛКС) жидкостей [16], атомно-силовой микроскопии (АСМ) твердого остатка наночастиц после испарения наножидкости [17], определения поверхностного натяжения (ПН) наножидкостей методом отрыва капель [18], определения удельного объемного электрического сопротивления (УОЭС) наножидкостей [19].

**Результаты.** Результаты ЛКС, полученные на установке «ЛКС-03» с гелий-неоновым лазером с длиной волны 632 нм показали, что при электрофизическом воздействии происходит относительное изменение размеров и концентрации кластеров в исследуемых жидкостях. Распределение размеров кластеров в дистиллированной воде можно охарактеризовать наличием трех пиковых мод 4-5 нм, 90-100 нм и 1000 нм. При электрофизической обработке в дистиллированной воде доля кластеров с размерами 4-5 нм увеличилась в 1,5 раза. Также наблюдалось увеличение количества кластеров размерами 90-100 нм на 35%, кластеры с размером 100-900 нм практически не наблюдались, но фиксировались до 5 об. % кластеров диаметром 2000-3000 нм (рис. 1).

Распределение размеров кластеров в этаноле можно охарактеризовать наличием двух пиковых мод 40-60 нм и 6000-10000 нм. При электрофизическом воздействии доля кластеров в этаноле с размерами 40-60 нм увеличилась в 4 раза. Также наблюдалось уменьшение количества кластеров размерами 6000-10000 нм приблизительно 2 раза (рис. 2).

Следует отметить, что в течение 5-10 мин после прекращения электрофизического воздействия распределение кластеров в жидкостях возвращалось к исходному состоянию.

При исследовании УНС методом АСМ на установке «*Niegra-Spectra*» (сканирующий модуль «*SN40830*», полуконтактный метод, стеклянные подложки размерами 10x10 и 5x5 мкм) наблюдалось уменьшение размеров агломераций наночастиц при электрофизическом воздействии в сравнении с контрольными образцами (рис. 3).

В контрольных образцах агломерации УНС в дистиллированной воде неоднородны по размеру

и форме, их средний диаметр составляет 2,4 мкм и 2,1 мкм для *MWCNT* и *Astr* соответственно. При электрофизическом воздействии средний линейный размер агломераций уменьшился до 0,2 мкм и 0,15 мкм *MWCNT* и *Astr* соответственно.

При диспергировании УНС в этаноле агломерации *MWCNT* и *Astr* имеют размеры 2-3 мкм и также

неоднородны по размеру. При электрофизическом воздействии размеры агломераций существенно уменьшаются и составляют 0,1 и 0,08 мкм для *MWCNT* и *Astr* соответственно. Также для отдельных образцов *MWCNT* в условиях электрофизического воздействия наблюдалась взаимная ориентация наночастиц на подложке (рис. 4).

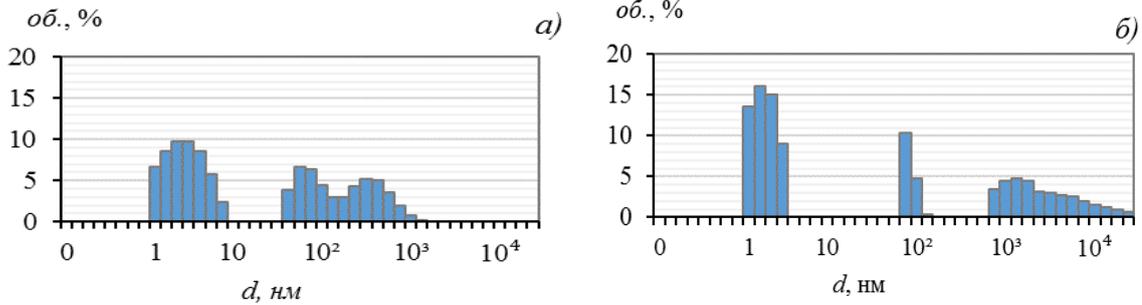


Рисунок 1 – Объемное распределение кластеров в дистиллированной воде по размерам: контрольный образец (а), при электрофизическом воздействии (б)

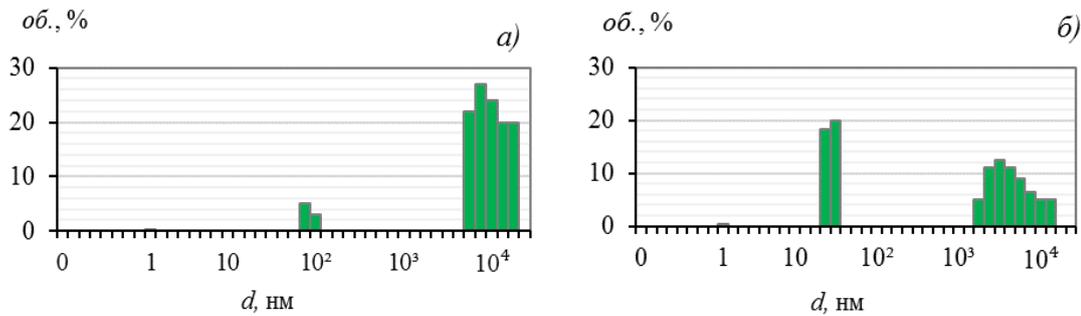


Рисунок 2 – Объемное распределение кластеров в этаноле по размерам: контрольный образец (а), при электрофизическом воздействии (б)

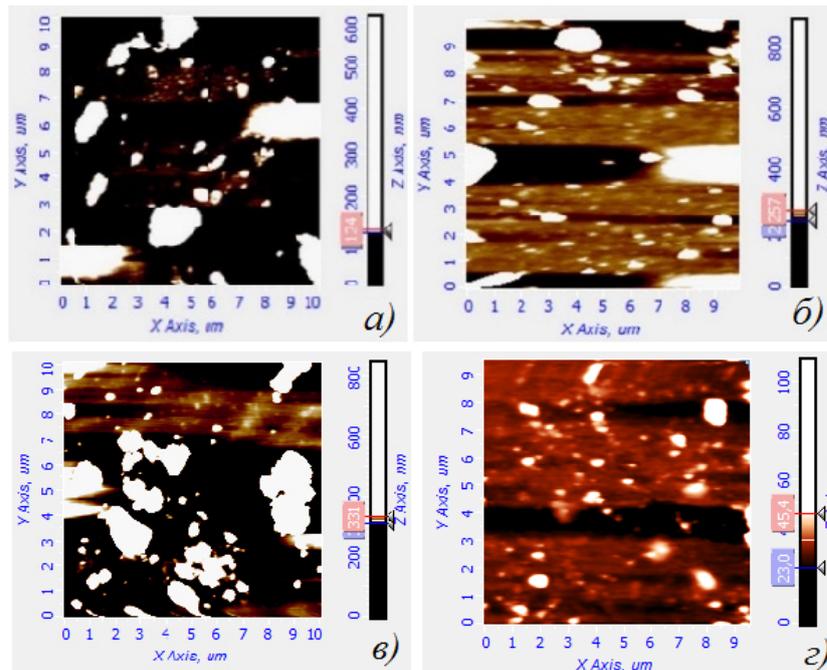


Рисунок 3 – АСМ сканы твердого остатка агломераций *MWCNT* и *Astr* в дистиллированной воде в концентрации 0,5 об. %: контрольные образцы (а, в) и в условиях электрофизического воздействия (б, г)

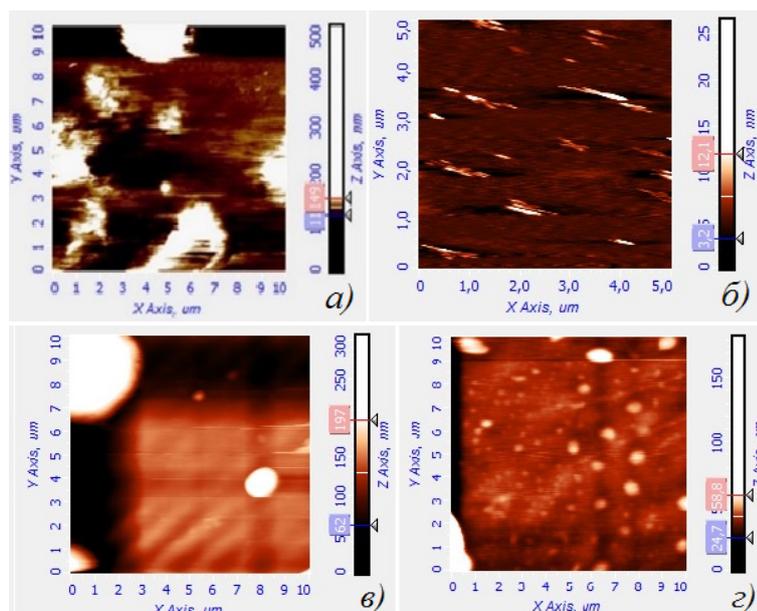


Рисунок 4 – АСМ сканы твердого остатка агломераций MWCNT и Astr в этаноле в концентрации 0,5 об. % : контрольные образцы (а, в) и в условиях электрофизического воздействия (б, г)

Результаты исследования влияния концентрации УНС на поверхностное натяжение наножидкостей показали, что в целом с увеличением концентрации наночастиц наблюдается рост значений ПН.

Заметный рост ПН на 20-30% для наножидкостей на основе дистиллированной воды происходил только при концентрации MWCNT более 0,5 об. %. При диспергировании Astr в дистиллированной воде фиксировался линейный рост ПН на 21-25% в сравнении с немодифицированной жидкостью. Также наблюдалось уменьшение ПН наножидкостей в сравнении с контрольными образцами при концентрации УНС 0,2 об. % в условиях, когда электрофизическое воздействие не применялось (рис. 5).

Для наножидкостей на основе этанола при диспергировании MWCNT происходило увеличение ПН на 36 % при концентрации наночастиц 1,0 об. %. При этом в интервале концентрации MWCNT 0,1-0,75 об. % наблюлось интенсивное образование агломераций УНС. При диспергировании Astr ПН увеличивалось при росте концентрации наночастиц

до 1,0 об. % с максимальным увеличением значений ПН на 33 %. При использовании Astr наножидкости на основе этанола были более стабильны.

При электрофизическом воздействии относительное изменение ПН при концентрации УНС 1,0 об. % составило 60% для MWCNT и 83,5 % для Astr (рис. 6).

Результаты исследований влияния концентрации УНС на УОЭС наножидкостей, описывающиеся соотношением  $lg(\rho_v/\rho_0)$ , где  $\rho_v, \rho_0$  – соответственно, измеренное значение УОЭС модифицированных и базовой жидкостей, приведены на рисунках 7 и 8 .

Диспергирование УНС в воде в целом приводит к уменьшению УОЭС наножидкостей в сравнении с базовыми, при концентрации MWCNT и Astr до 0,5 об. % и 1,0 об. % соответственно. Дальнейшее увеличение концентрации УНС приводит к неупорядоченному изменению УОЭС наножидкости. При электрофизическом воздействии УОЭС наножидкостей линейно снижается при увеличении концентрации наночастиц.

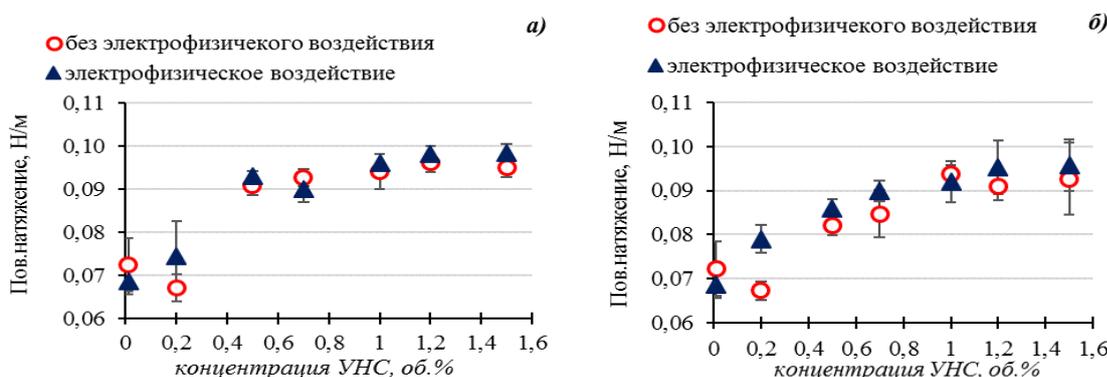


Рисунок 5 – Зависимость поверхностного натяжения наножидкостей на основе дистиллированной воды от концентрации MWCNT (а) и Astr (б)

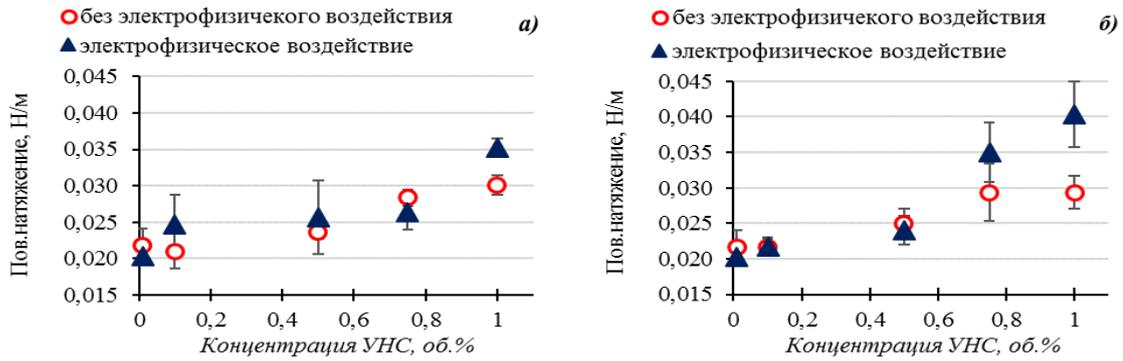


Рисунок 6 – Зависимость поверхностного натяжения наножидкостей на основе этанола от концентрации MWCNT (а) и Astr (б)

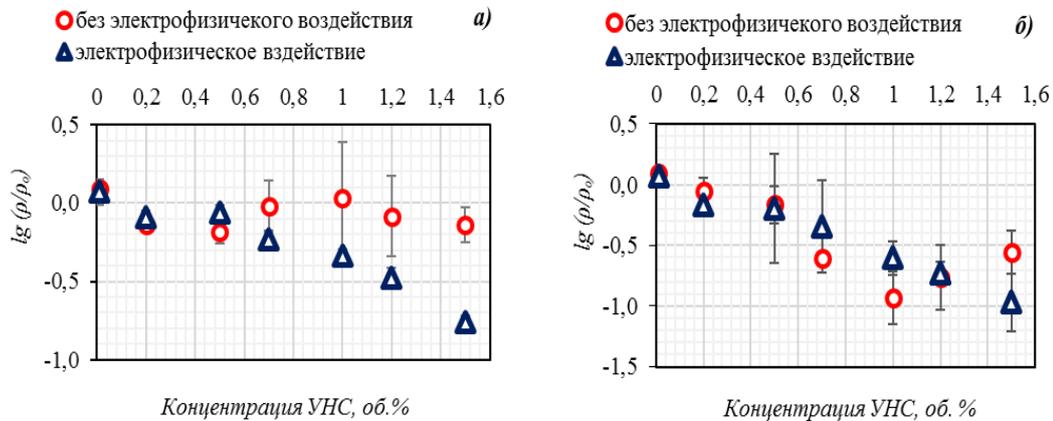


Рисунок 7 – Зависимость УОЭС наножидкостей на основе дистиллированной воды от концентрации MWCNT (а) и Astr (б)

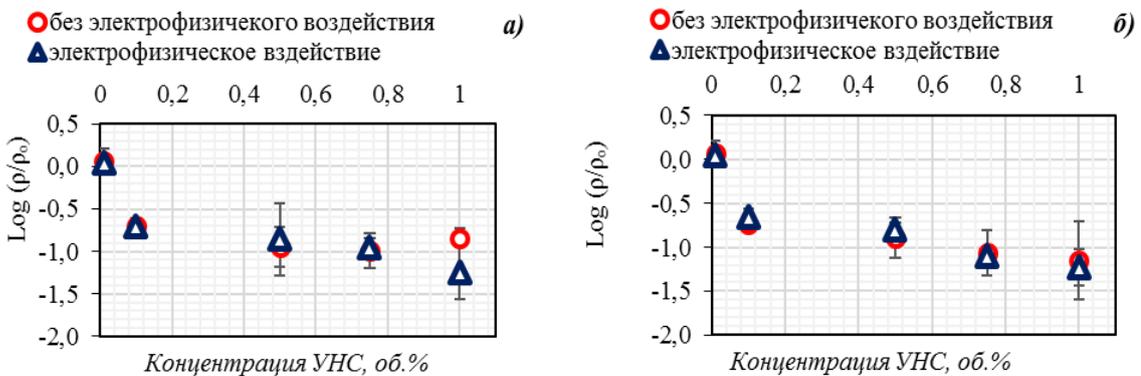


Рисунок 8 – Зависимость УОЭС наножидкостей на основе этанола от концентрации MWCNT (а) и Astr (б)

Для наножидкостей на основе этанола уменьшение УОЭС наблюдается на всем интервале исследуемых концентраций УНС, как при электрофизическом воздействии, так и при его отсутствии.

**Обсуждение.** Процессы смачивания и теплообмена при пожаротушении и формировании огнезащитных покрытий зависят от характера межмолекулярных взаимодействий на границе раздела фаз. При электрофизическом воздействии за счет переориентации поляризованных молекул жидкости происходил рост количества надмолекулярных структур меньших размеров, что, в свою очередь, приводило к уменьшению ПН [20]. Дальнейшее уменьшение ПН наблюдалось в

условиях модифицирования базовых жидкостей наноструктурами в концентрациях до 0,1 об. %, что является следствием ван-дер-ваальсовых взаимодействий молекул жидкости с адсорбционными центрами на поверхности УНС [21]. Дальнейшее увеличение концентрации наночастиц приводит к возникновению дополнительных центров кластерообразования, что влечет за собой увеличение ПН жидкостей, что подтверждается результатами измерений. Рост значений ПН наножидкостей при дальнейшем увеличении концентрации УНС в отсутствие электрофизического воздействия не происходил, что связано с образованием крупных агломераций наночастиц и их интенсивным оса-

дением. При электрофизическом воздействии рост значений ПН наножидкостей продолжался за счет их стабилизации, что подтверждается результатами АСМ и измерений УОЭС.

Результаты АСМ показали, что при диспергировании УНС в сочетании с электрофизическим воздействием происходит самоорганизация надмолекулярных структур в жидкостях [22-24], что обеспечивает пролонгацию эффектов, возникающих при наномодифицировании ОТВ и ОС.

Кроме того, нужно отметить, что ультразвуковая обработка в течение сравнительно небольшого времени не позволяет получить однородные дисперсии, а наблюдаемое при АСМ образование агломератов УНС различной формы, по-видимому, связано с различной смачиваемостью наночастиц [10].

**Выводы.** Наноструктуры, образующиеся на границе раздела фаз «жидкость-жидкость», «жидкость-твердое вещество» в базовых жидкостях при электрофизической обработке и диспергировании УНС, способствуют изменению адгезионных и когезионных сил, за счет чего возможно управление эксплуатационными характеристиками ОТВ и ОС на стадиях их подготовки и применения.

Время существования наноструктур при электрофизическом воздействии, обусловленное тепловым движением молекул невелико (порядка 10-11 с.) [25], что затрудняет использование технологии электрофизического воздействия без введения дополнительных модификаторов.

По результатам экспериментальных исследований можно сделать выводы о том, что введение в базовую жидкость *MWCNT* и *Astr* в концентрациях 0,2-0,5 об. % обеспечивает наибольшее изменение ПН базовых жидкостей.

Использование УНС в качестве модификаторов в ОТВ и ОС с концентрацией более 1,0 об. % без электрофизического воздействия, по-видимому, не будет иметь значительного эффекта ввиду интенсивного образования крупных агломераций, что негативно влияет на эксплуатационные характеристики получаемых составов.

Дальнейшее изменение адгезионных и когезионных свойств составов возможно при использовании электрофизического воздействия, которое обеспечивает стабилизацию наноструктур в базовых жидкостях.

Концептуальный механизм управления свойствами ОТВ и ОС включает в себя стадии диспергирования УНС, образования «долгоживущих» наноструктур в базовых жидкостях и их стабилизация в условиях электрофизического воздействия, обеспечивающее изменение эксплуатационных характеристик ОТВ и ОС. Возможности применения механизмов наномодифицирования с помощью электрофизического метода управления свойствами в объеме жидкости и на границе раздела фаз «жидкость-жидкость» и «жидкость-твердая наночастица» могут быть применены при разработке новых и модер-

низации существующих технологий получения ОТВ и ОС для систем противопожарной защиты опасных производственных объектов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Nolan D. P. Handbook of fire and explosion protection engineering principles: for oil, gas, chemical and related facilities. – William Andrew. – 2014. – 351 с. DOI: 10.1016/B978-1-4377-7857-1.00001-X.
2. Жуйков Д. А., Старков Н. Н., Руфанов К. А. О повышении эффективности теплопереноса новыми огнетушащими составами // Технологии техносферной безопасности. – 2017. – №. 1. – С. 62-69.
3. Ненахов С.А., Пименова В.П. Физико-химия вспенивающихся огнезащитных покрытий на основе полифосфата аммония (обзор литературы) // Пожаровзрывобезопасность. – 2010. – Т. 19. – №. 8. – С. 11-58.
4. Morgan, A.B. Flame retardant polymer nanocomposites / A.B. Morgan, C.A. Wilkie // John Wiley & Sons. – 2007. – 422 с.
5. Иванов А. В., Торопов Д. П., Медведева Л. В., Калинин 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.
6. Ponomarev A. N., Ivanov A. V., Suyasova M. V., Savenkova A. Ye., Pyatin D. V., Voytenok O. V. Investigation of extinguishment process of liquid hydrocarbon flames by aqueous suspensions of astralenes // Fire Technology. – 2021. – С. 1-15. DOI: 10.1007/s10694-021-01094-1.
7. Иванов А.В., Боева А.А., Дементьев Ф.А., Рябов А.А. 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.
8. Иванов А.В., Столяров С. О., Дементьев Ф. А., Ферулев А. П. Исследование эксплуатационных характеристик огнезащитных покрытий на основе эпоксидных смол, модифицированных астраленами // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. – 2020. – Т. 29. – №. 1. – С. 55-68. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.55-68.
9. Иванов А.В., Мифтахутдинова А.А., Ивахнюк Г.К., Башаричев А.В. Физико-технологические принципы и методика управления пожароопасными процессами при обращении с жидкими углеводородами в условиях стабилизации наноструктур // Пожаровзрывобезопасность. – 2018. – Т. 27. – №. 12. – С. 7-18. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.12.7-18.
10. Порозова С.Е., Поздеева Т.Ю., Вохмяхин Д.С., Лаптева Ю.А. Влияние гидрофильных сред на характеристики диспергируемых многостенных углеродных нанотрубок // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2020. – Т. 22. – №. 2. С. 23-30.
11. Суздаев И.П. Нанотехнология. Физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. М.: – 2005. – С. 589.
12. Смирнов А.Н., Абабаков Н.В., Пимонов М.В. Физические основы нанотехнологий // Учебное пособие. Кемерово.: – 2012. – 123 с.
13. Yu, W. A review on nanofluids: preparation, stability mechanisms, and applications / W. Yu, H. Xie // Journal of nanomaterials. – 2012. – Т. 2012. DOI: 10.1155/2012/435873.
14. Рамзани М. С., Панферова Т. В., Иванов А. В., Ивахнюк Г. К. О вероятных механизмах взаимодействия переменных электрических полей с жидкостями различной полярности // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2020. – №55 (81). – С. 39-42. DOI: 10.36807/1998-9849-2020-55-81-39-42.
15. Способ и устройство управления физико-химическими процессами в веществе и на границе раздела фаз / Г.К. Ивахнюк, В.Н. Матюхин, А.В. Иванов [и др.] // Патент Российской Федерации № 2479005 С2. – 2013. – Бюл. № 10.

16. Kaszuba M., McKnight D., Connah M. T., McNeil-Watson F. K., Nobbmann U. Measuring sub nanometre sizes using dynamic light scattering // Journal of Nanoparticle Research. – 2008. – Т. 10. – №. 5. – С. 823-829. DOI: 10.1007/s11051-007-9317-4.
17. Мошников, В. А., Спивак Ю. М. Атомно-силовая микроскопия для нанотехнологии и диагностики : учебное пособие // Санкт-Петербург : Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ". – 2009. – 78 с.
18. Tanvir, S., Qiao L., Surface tension of nanofluid-type fuels containing suspended nanomaterials // Nanoscale research letters. – 2012. – Т. 7. – №. 226. – С. 1-10. DOI: 10.1186/1556-276X-7-226.
19. Иванов, А.В. Сорокин А.Ю., Демехин В.Ф. 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.
20. Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкостей. – Л.: Наука, 1975. – 592 с.
21. Walther J. H., Jaffe R., Halicioglu T., Koumoutsakos T. Carbon nanotubes in water: structural characteristics and energetics // The Journal of Physical Chemistry B. – 2001. – Т. 105. – №. 41. – С. 9980-9987. DOI: 10.1021/jp011344u.
22. Li Q., Zhu Y. T., Kinloch I. A., Windle A. H. Self-organization of carbon nanotubes in evaporating droplets // The Journal of Physical Chemistry B. – 2006. – Т. 110. – №. 28. – С. 13926-13930. DOI: 10.1021/jp061554c.
23. Bhattacharya P., Sahoo S., Das C. K. Microwave absorption behaviour of MWCNT based nanocomposites in X-band region // Express Polymer Letters. – 2013. – Vol. 7, No. 3. – P. 212-223. DOI: 10.3144\_expresspolymlett.2013.20.
24. Shames A. I., Katz E.A., Panich A. M. и др. Structural and magnetic resonance study of astralen nanoparticles //Diamond and Related Materials. – 2009. – Т. 18. – №. 2-3. – С. 505-510. DOI: 10.1016/j.diamond.2008.10.056.
25. Гончарук В. В., Смирнов В.Н., Сыроешкин А.В. и др. Кластеры и гигантские гетерофазные кластеры воды // Химия и технология воды. – 2007. Т. 29, – №1. С.1-17.

*Статья поступила в редакцию 07.06.2022*

*Статья принята к публикации 16.09.2022*

УДК 331.452

DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0023

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ РИСКОВ

© Автор(ы) 2022

SPIN: 8258-7746

AuthorID: 942522

ORCID: 0000-0003-4236-8201

**КУЗНЕЦОВА Дарья Александровна**, старший преподаватель  
кафедры «Промышленной безопасности и инженерных систем»

*Вятский государственный университет*

*(610000, Россия, Киров, улица Московская, 36, e-mail: da\_kuznetsova@vyatsu.ru)*

**Аннотация.** Процедура управления риском появилась еще в начале XX века, однако наибольшую популярность приобрела лишь к середине XX века. Одним из этапов данной процедуры является идентификация опасностей и оценка рисков. Начиная с 2022 года оценка профессиональных рисков стала обязательной для всех работодателей, однако не было предложено единой методики. Проанализировав источники литературы, мы выбрали наиболее популярные методы оценки рисков (Матричный метод, метод Файн-Кинни, Интервью, Чек-лист, Мозговой штурм, метод Элмери, оценка индивидуального профессионального риска, анализ «Галстук-бабочка»), ознакомились с методикой их проведения и провели их сравнительный анализ. Все перечисленные методы имеют свои положительные (простота использования, широта применения, количественное выражение результата и вовлечение большого количества заинтересованных лиц) и отрицательные (субъективизм, затрата большого количества времени на проведение и обработку результатов, необходимость в экспертах высокого уровня) стороны. По результатам анализа был сделан вывод о том, что метод оценки профессиональных рисков Файн-Кинни является наиболее подходящим.

**Ключевые слова:** оценка рисков, профессиональный риск, методика, анализ, травматизм, производственные факторы, опасности.

## COMPARATIVE ANALYSIS OF RISK ASSESSMENT METHODS

© Author(s) 2022

**KUZNETSOVA Daria Alexandrovna**, senior lecturer of the  
Department of Industrial Safety and Engineering Systems

*Vyatka State University*

*(610000, Russia, Kirov, Moskovskaya street, 36, e-mail: da\_kuznetsova@vyatsu.ru)*

**Abstract.** The risk management procedure appeared at the beginning of the 20th century, however, it gained the greatest popularity only by the middle of the 20th century. One of the steps in this procedure is hazard identification and risk assessment. Since 2022, occupational risk assessment has become mandatory for all employers, but no single methodology has been proposed. After analyzing the literature sources, we chose the most popular risk assessment methods (Matrix method, Fine-Kinney method, Interview, Checklist, Brainstorming, Elmerly method, individual occupational risk assessment, Bow-tie analysis), got acquainted with the methodology for their implementation and carried out their comparative analysis. All of these methods have their positive (ease of use, breadth of application, quantitative expression of the result and the involvement of a large number of stakeholders) and negative (subjectivity, spending a lot of time on conducting and processing the results, the need for high-level experts) sides. Based on the results of the analysis, it was concluded that the Fine-Kinney occupational risk assessment method is the most appropriate.

**Keywords:** risk assessment, occupational risk, methodology, analysis, injuries, production factors, hazards.

**Для цитирования:** Кузнецова Д.А. Сравнительный анализ методов оценки рисков / Д.А. Кузнецова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022. – Т. 11. – № 3(59). – С. 154-158. – DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0023.

**Введение.** В настоящее время существует больше 40 методов оценки рисков [1].

Согласно ГОСТ Р 12.0.010-2009 «ССБТ. Система управления охраной труда. Определение опасностей и оценка рисков» все методы оценки рисков для здоровья работников можно разделить на две группы. Первая группа – это прямые, методы на основе статистической информации, вторая группа – косвенные, методы на основе использования показателей, характеризующих отклонение контролируемых условий от норм и имеющих причинно-следственную связь с

риском. Прямые методы в свою очередь делятся на количественные и качественные [2, 3].

Использование прямой количественной оценки рисков возможно, лишь при условии, что в организации имеются данные о большом количестве случаев производственного травматизма и профессиональных заболеваний, и степени их тяжести, т.е. только в ограниченных случаях. Этот метод наиболее эффективен на начальной стадии планирования и размещения опасных установок, при оценке опасности работы с однотипным оборудованием (например,

трубопроводы), при необходимости получения данных по комплексной оценке воздействия потенциально возможной аварии на окружающую среду, материальные объекты и людей, при разработке мер по ликвидации чрезвычайных ситуаций в регионе, имеющем большое количество опасных производств.

Если в организации нет достаточного количества данных, то можно использовать прямые качественные методы. В их основе лежат балльные оценки условий труда, установленные экспертами и специалистами оценочной команды [2, 3].

Косвенные методы оценки риска применяются для оценки отклонения текущих показателей или условий от нормы. К таким условиям можно отнести: превышение значений вредных и опасных производственных факторов, предельно допустимых концентраций, уровней и прочих нормативов; общее количество факторов производственной среды имеющих отклонение от нормы; отношение нормативных требований, выполняемых на рабочем месте, к общему их количеству.

**Методология.** С 2022 года эта процедура оценки рисков стала обязательной для всех. При этом не существует установленной методики по оценке рисков. В связи с этим целью данной статьи является анализ наиболее популярных методов оценки рисков для выявления универсального.

**Результаты.** Рассмотрим наиболее популярные методы оценки профессиональных рисков на рабочем месте согласно источникам литературы.

**Матричный метод.** Данный метод считается одним из наиболее распространенных.

Матрица степени риска, которую называют матрицей значимости (тяжести) и возможности (вероятности) последствий или матрицей последствий и вероятностей риска, является средством объединения качественных или смешанных оценок тяжести и возможности (вероятности) реализации риска [4]. Данный метод позволяет наглядно продемонстрировать величину риска с помощью двух переменных шкал. Внешний вид матрицы (формат, количество строк и столбцов, их наименования) определяется в зависимости от конкретных обстоятельств, но в конечном итоге матрица должна соответствовать рассматриваемой ситуации [4].

Матрица рисков обычно применяется как средство предварительной оценки риска в случае, когда выявлено несколько рисков и нужно определить риск с наибольшей значимостью [4].

Оценка рисков данным методом проводится в пять этапов (шагов):

1. Сбор данных об условиях труда;
2. Формирование реестра опасностей;
3. Непосредственно оценка риска;
4. Разработка мероприятий по снижению уровня профессиональных рисков и устранению опасностей;
5. Фиксирование полученных результатов [5].

Основные *преимущества* данного метода: возможность совмещения двух характеристик –

возможность/вероятность возникновения опасности и значимость/тяжесть последствий [6]; наглядность; минимальные затраты на проведения; числовое выражение результатов [7], возможность ранжирования нескольких рисков с целью выявления наиболее значимых [1, 4]; возможность использования метода на всех уровнях организации; может быть использован для определения приемлемости или неприемлемости риска; возможность использования при недостаточном количестве исходных данных для детального анализа; обеспечивает четкое визуальное отображение значимости соответствующего риска от его последствий или его вероятности [1]. *Недостатки:* ранжирование шкал при построении матрицы [1, 6, 7]; субъективизм, необходимость высокого уровня квалификации эксперта [1, 7]; необходима постоянная актуализации по мере выявления новых опасностей; трудности при сопоставлении уровня риска с его последствиями [1].

**Метод Файн-Кинни.** Данный метод так же считается одним из самых распространенных [9].

С помощью данного метода можно учесть вероятность возникновения риска, тяжесть последствий и распространённость риска в организации [6-13].

Оценка рисков производится в пять этапов (шагов):

1. Выявление угрозы;
2. Определение пострадавших и последствия;
3. Непосредственно оценка рисков и определение предупреждающих мер;
4. Фиксирование результатов оценки;
5. Пересмотр итогов оценки и их совершенствовании [14].

По данному методу риск определяется как произведение трех составляющих – степени подверженности воздействию опасности на работника на рабочем месте, возможности возникновения угрозы на рабочем месте и тяжести последствий для работников в том случае, если угроза реализуется [4].

Для каждой профессии рассматривается каким образом то или иное нарушение требований охраны труда может привести к травме или профессиональному заболеванию работника. Причем рассматривается все время работы – от подготовки до ее завершения [4].

Основные *преимущества* данного метода: простота и наглядность результатов [4, 6, 12]; простота расчетов; количественное выражение результата [15]; возможность планирования мероприятий с учетом значимости риска; подходит для любого предприятия [16]. *Недостатки:* субъективность [4, 6]; отсутствие стандартизированной анкеты, которая помогала бы провести проверку по заранее предусмотренным элементам производственной среды [12]; необходимы высококвалифицированные эксперты [12, 17]; использование трех переменных вместо двух [18]; возможность оценки только конкретного происшествия, но не целого предприятия [15].

**Метод оценки индивидуальных профессиональных рисков (ИИПР).** Данную методику разработал ЗАО

«Клинический институт охраны и условий труда». При оценке ИПР учитываются условия труда на рабочем месте и состояние здоровья работника (возраст, стаж, зафиксированные случаи профзаболевания и травмирования) [14, 19].

По методике сначала происходит взвешивание классов условий труда, полученных при СОУТ. Каждому классу присваивается балл в зависимости от возможности воздействия производственных факторов на работника. Чем выше балл, тем больше не соответствие реальных условий труда гигиеническим нормативам [14].

Основные *преимущества* данного метода: возможность охвата большого количества факторов; учитываются индивидуальные особенности работника [14, 15]; детальная проработка [14]. *Недостатки*: требует большого количества времени и сил для обработки результатов [15], большое количество показателей; учет данных СОУТ при расчете показателя [14].

*Метод интервью*. Метод основан на опросе отдельной группы работников, работающих в одном цехе/отделе или обслуживающих одно оборудование. Целями использования метода является получение информации об опасностях, с которыми может столкнуться работник, а также вовлечение в процесс оценки работников [4].

Основные *преимущества* данного метода: возможность опрашиваемого обдумать свой ответ, вовлечение в процесс большого количества заинтересованных лиц [4]. *Недостатки*: необходимость затраты времени на получение и обработку информации; не задействуется воображение и широкий анализ при оценке ситуации, наличие погрешности в ответах; эффективен только при работе с опытными сотрудниками, необходимо проводить непосредственно на месте [4].

*Метод контрольных листов («чек-листов»)*. Контрольный лист – это перечень опасностей и/или рисков, который формируется на основе данных производственного контроля, предыдущих оценок рисков. Данный метод широко применяется на практике как самостоятельно, так и в группе с другими методами [4].

Каждая организация самостоятельно составляет контрольный лист опираясь на специфику своего производства. Но вместе с тем есть и типовые контрольные листы для сформированные для отдельных опасностей и профессий.

Основные *преимущества* данного метода: простота; объединяет большое количество данных; может применяться на любом этапе выполнения работ; может использоваться не только экспертом, но и руководителем любого уровня; подходит небольшим предприятиям [4]; имеются готовые формы. *Недостатки*: подходит только для давно организованных рабочих мест с хорошо известными технологиями и материалами, оборудованием, сырьем и известными опасностями; существует возможность

упустить важные моменты; используется только для уже известных опасностей; формальность подхода [4].

*Метод мозгового штурма*. Основная идея данного метода – обсуждение проблемы группой специалистов. Результатом данной работы становится перечень возможных опасностей и рисков. Данный метод считается наиболее оперативным для идентификации опасностей и качественной оценки рисков при рассмотрении всех возможных сценариев. Мозговой штурм можно применять как самостоятельный метод или в группе с другими. Наиболее эффективен на предварительном этапе, когда нужно составить перечень вопросов для дальнейшего более подробного обсуждения [4].

Основные *преимущества* данного метода: развитие у участников обсуждения нестандартного мышления; вовлечение в процесс обсуждения всех заинтересованных сторон [1, 4]; легкость и скорость получения результатов [4]; возможность применения при недостатке данных и использовании новых технологий [1]. *Недостатки*: для получения качественных результатов все участники обсуждения должны иметь достаточный уровень знаний и навыков; результаты метода трудно проверить; потеря идей при обсуждении из-за доминирования некоторых участников [1, 4]; трудно подтвердить, что анализ был всеобъемлющий; трата времени на обсуждения, отходящие от основного вопроса [1].

*Метод Элмера*. Данный метод является визуальным методом наблюдения за условиями труда на рабочем месте с помощью проверочных листов [4]. Уровень безопасности при этом выражается в процентах в виде индекса Элмера:

$$\text{Индекс Элмера} = \frac{\text{пункты «хорошо»}}{\text{пункты «хорошо»} + \text{пункты «плохо»}} \times 100\%$$

Основные *преимущества* данного метода: простота использования; простота расчета индекса; удобство при ведении наблюдения за устранением выявленных ранее рисков [2]; количественное отображение результатов [15]; подходит для небольших предприятий; позволяет планировать мероприятия по улучшению условий труда [20]; имеется готовая анкета. *Недостатки*: недостаточная информативность итогового коэффициента [2, 4, 21]; отсутствие возможности вычленения главного фактора или группы факторов, влияющих на безопасность рабочего места [2, 4, 15, 21, 22]; отсутствие возможности идентификации различных рисков на рабочем месте [16]; невозможность планирования мероприятий по охране труда [14, 16]; невозможность информирования работников о возможных рисках [16].

*Анализ Галстук-бабочка*. Данный метод представляет собой графическое изображение путей развития событий, начиная от причин и заканчивая их последствиями, а также включает средства контроля, которые могут повлиять на ход развития события и/или последствий этого события [1].

Реализация этого метода происходит пошагово:

1. Определение опасного события;
2. Составление перечня причин данного события;
3. Определение механизмов развития опасностей;
4. Графическое изображение результатов;
5. Изображение барьеров на пути причин возникновения событий;
6. Определение и изображение последствий выбранного события;
7. Изображение барьеров на пути реализации последствий события;
8. Отображение на диаграмме вспомогательных функций управления [5].

Анализ Галстук-бабочка рекомендуется использовать после того, как выявлены все опасные ситуации и их источники [5].

Основные *преимущества* данного метода: дает четкое наглядное представление о причинах и последствиях события; обращает внимание на средства контроля, которые необходимо применить для предотвращения события или его последствий; не требует высокого уровня знаний от экспертов [1]; вовлечение всех заинтересованных лиц [5]. *Недостатки*: вероятность упрощения ситуации [1]; узость применения [5]; для получения цифрового значения риска необходимо иметь большое количество статистических данных.

Ознакомившись и проанализировав наиболее популярные методы оценки рисков, мы выявили их преимущества и недостатки. На основании всех данных сформируем таблицу (табл. 1) для наглядности.

Таблица 1 – Сводная таблица преимуществ и недостатков основных методов оценки рисков

Метод	Преимущества						Недостатки							
	Простота	Наглядность	Широта применения	Учет большого количества факторов	Количественное выражение результата	Вовлечение большого количества заинтересованных лиц	Узость применения	Субъективизм	Высокий уровень экспертов	Большие затраты времени	Отсутствие идентификации опасности	Использование большого количества переменных	Сложно интерпретировать результат	Необходимость проводить непосредственно на месте
Матричный метод		+	+		+			+	+					
Файн-Кинни	+	+	+		+			+	+		+			
Интервью						+			+	+			+	+
Чек-листы	+		+	+		+	+	+	+	+				+
Мозговой штурм	+					+		+	+				+	
Элмери	+		+		+			+		+				+
Метод ИПР				+	+		+			+		+		
Анализ Галстук-бабочка		+		+		+	+	+						

**Обсуждение.** Проанализировав наиболее популярные методы оценки рисков, мы выявили, что большинство методов обладают такими преимуществами, как простота использования, что является одним из ведущих критериев при выборе метода оценки рисков, широта применения (подходят для различных отраслей и размеров предприятия), количественное выражение результата и вовлечение большого количества заинтересованных лиц.

Основными же недостатками являются: субъективизм, затраты времени на получение и обработку результатов и необходимость в экспертах высокого уровня. А также узконаправленность методов применения, что выражается в оценке отдельно взятого рабочего места или же возможность оценки выбранного рабочего места только при наличии большого количества информации для обработки.

**Выводы.** Основываясь на результатах анализа, можно сделать вывод, что наиболее подходящим методом для оценки рисков является метод Файн-Кинни. Данная методика позволит провести оценку профессиональных рисков в организациях любого уровня и специфики. Недостаток субъективизма оценки можно снизить путем создания комиссии по оценке рисков из нескольких экспертов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. ГОСТ Р МЭК 31010-2021. Надежность в технике. Методы оценки риска. [Текст]. – Введ. 2022-01-01. М. : Изд-во Стандартиформ, – 2019. – 29 с.
2. Браун, А.А. Методы оценки рисков в системе управления безопасностью труда // GaudeamusIgitur. – 2015. – № 4. – С. 5-8.
3. ГОСТ Р 12.0.010-2009. Система стандартов безопасности труда. Системы управления охраной труда. Определение опасностей и оценка рисков [Текст]. – Введ. 2011-01-01. М. : Изд-во Стандартиформ, 2019. – 20 с.

4. ГОСТ 12.0.230.5-2018. Система стандартов безопасности труда. Системы управления охраной труда. Методы оценки риска для обеспечения безопасности выполнения работ [Текст]. – Введ. 2019–06–01. М. : Изд-во Стандартиформ, 2019. – 23 с.

5. Клинский институт охраны и условий труда [Электронный ресурс] <https://www.kiout.ru/info/publish/22928> (дата обращения: 24.03.2022).

6. Белокрылова Е.Л. О применимости различных методов оценки профессионального риска // Экология. Риск. безопасность: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Курган, 29–30 октября 2020 года. – Курган: Курганский государственный университет, 2020. – С. 215-217.

7. Меркулова Е.В., Макушкин В.П. Оценка производственного риска и методы управления им на предприятии машиностроительного комплекса // Auditorium. 2019. №3 (23). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-proizvodstvennogo-riska-i-metody-upravleniya-im-na-predpriyatii-mashinostroitel'nogo-kompleksa> (дата обращения: 21.03.2022).

8. Булгаков А.О. Совершенствование метода оценки профессиональных рисков «Файна-Кинни» // Конкурс научно-исследовательских работ, Москва, 08–11 декабря 2020 года. – Москва: Ассоциация разработчиков, изготовителей и поставщиков средств индивидуальной защиты, 2020. – С. 41-44.

9. Латыпова Р. Р., Хаит Д.Д., Кандыбко А.П. Зарубежный опыт оценки рисков // Управление и планирование в экономике. 2018. – № 3. – Т. 19. – С. 75–77.

10. Файнбург, Г.З. О рисках запутаться в рисках при выявлении, оценке и управлении ими // Безопасность и охрана труда 2019. – № 1. – С. 9-24.

11. Ниметулаева Г.Ш. О методах оценки профессионального и экологического риска в области охраны труда // ГИАБ. – 2016. – №5. – С. 75-93.

12. Старовойтов, И.Г., Бирюк, В.А., Булавка, Ю.А. Методы оценки риска в системе управления охраной труда // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2018. – №1. – С. 5-17.

13. Евстигнеев, Н.С. Оценка уровней профессиональных рисков по методу Элмери и Файн–Кинни // Промышленная безопасность и экология: сборник материалов XIX сессии отраслевой молодежной школы-семинара. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2020. – С. 111–126.

14. Коробов, А.В. Оценка профессионального риска работников ТЭК как одного из основных элементов системы управления охраной труда : специальность 05.26.01 «Охрана труда (по отраслям)» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Москва, 2017. – 22 с.

15. Свиридова, Т.В., Боброва, О.Б., Саутина, Е.Д. Совершенствование методов определения профессиональной пригодности персонала для удаленных трудовых зон // Безопасность жизнедеятельности. – 2018. – № 7 (211). – С. 24-28.

16. Шилкина, А.Ю. Анализ методов оценки профессионального риска // Информационные технологии (IT) в контроле, управлении качеством и безопасности : сборник научных трудов VIII Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее», 7–12 октября 2019 г., г. Томск. – Томск : Изд-во ТПУ, 2019. – С. 350-353.

17. Кочакова, А.А., Иванова, М.В. Оценка профессионального риска работников предприятий ТЭК // Наука и образование сегодня. – 2019. – №6-1 (41). – С. 32-34.

18. Файнбург, Г.З. Методы оценки профессионального риска и их практическое применение (от метода Файна-Кинни до наших дней) // Безопасность и охрана труда / глав. ред. Н. Новиков. – 2020. – № 2. – С. 25-41.

19. Тимофеева, С.С. Современные методы оценки профессиональных рисков и их значение в системе управления охраной труда // XXI век. Техносферная безопасность. – 2016. – №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-metody-otsenki-professionalnyh-riskov-i-ih-znachenie-v-sisteme-upravleniya-ohranoy-truda> (дата обращения: 21.03.2022).

20. Магомедова, Н.З. Преимущества и недостатки популярных методов оценки профессиональных рисков //

Образование и наука в России и за рубежом. – 2020. – № 6.

21. Слободской, А.Л. Риски в управлении персоналом: учеб. пособие / под ред. проф. В.К. Потемкина. – СПб. : Изд-во СПбГУЭФ, 2011. – 155 с.

22. Мардонова, А.А., Криволапов, И.П., Фокин, А.А. Анализ методов оценки рисков // Наука и образование. – 2020. – Т. 3. – № 2. URL: <http://opusmgau.ru/index.php/see/article/view/1776> (дата обращения: 10.05.2022).

*Статья поступила в редакцию 28.06.2022*

*Статья принята к публикации 16.09.2022*

УДК 614.873.2

DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0024

**КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ПОДБОРУ СПЕЦИАЛЬНОЙ ОДЕЖДЫ БУРИЛЬЩИКА  
НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН С УЧЕТОМ ПОКАЗАТЕЛЯ *PMV***

© Автор(ы) 2022

SPIN: 9801-3490

AuthorID: 704170

ORCID: 0000-0002-7423-4892

ResearcherID: P-5020-2015

ScopusID: 6507592108

**КАВЕРЗНЕВА Татьяна Тимофеевна**, кандидат технических наук,  
доцент Высшей школы техносферной безопасности*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого**(195251, Россия, Санкт-Петербург, улица Политехническая, 29, e-mail: kaverzneva\_tt@spbstu.ru)*

SPIN: 2311-9384

AuthorID: 1155757

ORCID: 0000-0001-6067-6262

**ИВАНОВА Анна Андреевна**, магистр*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого**(195251, Россия, Санкт-Петербург, улица Политехническая, 29, e-mail: ivanova10.aa@edu.spbstu.ru)*

SPIN: 2907-5081

AuthorID: 1155841

ORCID: 0000-0001-7066-402X

**ЧУВАШОВА Ксения Дмитриевна**, магистр*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого**(195251, Россия, Санкт-Петербург, улица Политехническая, 29, e-mail: chuvashova.kd@edu.spbstu.ru)*

SPIN: 1353-8309

AuthorID: 970943

ORCID: 0000-0001-6319-5413

ScopusID: 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, Санкт-Петербург, Московский проспект, 149, e-mail: ig.skripnick2011@yandex.ru)*

**Аннотация.** Снижению риска возникновения у работников травм и профессиональных заболеваний способствует подбор качественной специальной одежды, соответствующей определенному климатическому поясу. Перед службой охраны труда на предприятиях стоит непростая задача выбора специальной одежды работников, осуществляющих свою профессиональную деятельность в сложных погодных условиях, способной обеспечивать оптимальный тепловой комфорт. У работников нефтегазового комплекса, занимающихся добычей, транспортировкой, хранением и переработкой нефти и газа, эта проблема стоит особенно остро. В статье проведено обоснование выбора специальной одежды для бурильщика нефтяных скважин, обеспечивающей соблюдение состояния теплового комфорта работника по показателям *PMV* и *CLO*, позволяющему комплексно оценить параметры микроклимата и теплоизоляционные свойства материала костюма, то есть учитывать энергозатраты работника, коэффициент теплоизоляции одежды и климатические условия местности, в которой выполняются работы. Были выбраны два защитных костюма, которые, по мнению производителей, соответствуют характеру выполняемой работы бурильщика. С помощью выполненного расчета показано преимущество применения одного из костюмов. Обоснование выбора качественной специальной одежды может быть рекомендовано работодателю при формировании бюджета на закупку средств индивидуальной защиты.

**Ключевые слова:** охрана труда, тепловой комфорт, спецодежда, теплоизоляция материалов, *CLO*, *PMV*, энергозатраты, климатический пояс, средства индивидуальной защиты, бурильщик.

**INTEGRATED APPROACH TO THE SELECTION OF SPECIAL CLOTHES  
OIL WELL DRILLER ACCORDING TO *PMV***

© The Author(s) 2021

**KAVERZNEVA Tatyana Timofeevna**, candidate of technical sciences,  
associate professor of the higher school of technosphere safety**IVANOVA Anna Andreevna**, master student**CHUVASHOVA Ksenia Dmitrievna**, master student**SKRIPNIK Igor Leonidovich**, candidate of technical sciences, associate professor,

associate professor of the department of fire safety of technological processes and production  
St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia,  
(196105, Russia, St. Petersburg, Moskovsky prospect, 149, e-mails: kaverzneva\_tt@spbstu.ru, ivanova10.aa@edu.spbstu.ru, chuvashova.kd@edu.spbstu.ru, ig.skripnick2011@yandex.ru)

**Abstract.** Reducing the risk of injuries and occupational diseases among workers is facilitated by the selection of high-quality special clothing that corresponds to a certain climatic zone. The labor protection service at enterprises faces the difficult task of choosing special clothing for workers who carry out their professional activities in difficult weather conditions, capable of providing optimal thermal comfort. For workers in the oil and gas complex involved in the production, transportation, storage and processing of oil and gas, this problem is especially acute. The article substantiates the choice of special clothing for an oil well driller, which ensures compliance with the state of thermal comfort of an employee in terms of PMV, which allows for a comprehensive assessment of the microclimate parameters and thermal insulation properties of the suit material, that is, taking into account the employee's energy consumption, the coefficient of thermal insulation of clothing and the climatic conditions of the area in which work. Two protective suits were chosen, formally corresponding, according to the manufacturers, to the nature of the work performed by the driller, and using the described integrated approach to the selection of workwear, the calculation showed the advantage of using one of the suits. The justification for the choice of high-quality special clothing can be recommended to the employer when forming the budget for the purchase of personal protective equipment.

**Keywords:** labor protection, thermal comfort, overalls, thermal insulation of materials, CLO, PMV, energy consumption, climate zone, personal protective equipment, driller.

*Для цитирования:* Каверзнева Т.Т. Комплексный подход к подбору специальной одежды бурильщика нефтяных скважин с учетом показателя PMV / Т.Т. Каверзнева, А.А. Иванова, К.Д. Чувашова, И.Л. Скрипник // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022. – Т. 11. – № 3(59). – С. 159-164. – DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0024.

**Введение.** Система управления охраной труда представляет собой совокупность различных взаимосвязанных элементов, целью создания которых является установление политики в области охраны труда (ОТ) на конкретном объекте, способствующей формированию культуры безопасности на предприятиях. Неукоснительное соблюдение правил по охране труда минимизирует число несчастных случаев (НС), аварий и инцидентов, но, к сожалению, реальная картина производственного травматизма и профессиональных заболеваний свидетельствует о недостаточности проводимых мероприятий. На постоянной основе должны реализовываться организационно-технические, медико-профилактические и иные мероприятия, на основании анализа имеющихся нормативно-правовых актов (НПА), регламентирующих сферу ОТ, актуализироваться и корректироваться документы, которые показали свою несостоятельность. Анализ причин травматизма и профессиональных заболеваний, степени тяжести полученных травм и периода восстановления показали необходимость усиления внимания к качеству и правильному использованию средств индивидуальной защиты (СИЗ) на рабочих местах (РМ).

С 1 марта 2022 года были внесены изменения в Трудовой кодекс РФ, с 09.2022 года должно действовать [1], касающееся составления инструкций по ОТ на РМ. Законодательно закрепили сроки стажировки, чего ранее не было, а также установили перечисление в инструкциях, используемых на конкретном РМ, СИЗ. Обязательным стало указание опасных, вредных производственных факторов (ОВПФ) и рисков на РМ.

Классификатор ОВПФ применяется при про-

ведении специальной оценки условий труда (УТ) аккредитованными организациями, но для специалиста по ОТ при редактировании и обновлении инструкций для их соответствия законодательству был бы полезен перечень рисков и ОВПФ для конкретного вида работ [2,3].

Теперь в инструкциях будет необходимо закреплять перечень применяемой на производстве спецодежды и спецобуви в соответствии с новым перечнем, предложенным в [4], который вступит в силу с 1 сентября 2023 года.

Организации чаще всего при закупке спецодежды руководствуются формальным перечнем защитных свойств материалов, используемых для пошива, и собственной экономической целесообразностью. Конечно, в НПА прописаны условия Крайнего Севера (северных районах или приравненных к таковым), но, к сожалению, требований к теплосохраняющим свойствам материалов одежды нет, что является серьезным упущением, учитывая, что большая территория нашей страны относится к таким проблемным по климату районам.

**Методология.** Проблему грамотного выбора СИЗ способен устранить риск-ориентированный подход в области обеспечения работников СИЗ (специальной одеждой). Риск-ориентированный подход позволит обеспечивать работника средствами защиты и спец-одеждой согласно тем профессиональным рискам, которые были выявлены специальной оценкой условий труда, а также будет учитываться климатический пояс, на котором проводятся работы и его погодные условия.

При вступлении в силу в 2023 году нового Приказа Минтруда России N 767н «Об утверждении Единых

типовых норм выдачи средств индивидуальной защиты и смывающих средств», средства индивидуальной защиты будут классифицироваться по следующим группам [4]:

- 1 – СИЗ в зависимости от воздействия ОВПФ;
- 2 – по видам работ;
- 3 – по уровню загрязнения;
- 4 – в зависимости от климатических факторов.

Таким образом, при введении 4-ой группы появится возможность избежать выдачи всем работникам одинаковых комплектов спецодежды (вне зависимости от климатической зоны, в которой выполняются работы).

Правильно подобранная спецодежда обеспечивает тепловой комфорт работников, что может значительно увеличить производительность труда и поспособствовать улучшению УТ [5,6]. Чтобы спецодежда обеспечила требуемый тепловой комфорт, необходимо учитывать не только параметры микроклимата рабочей среды, но и соответствующие энергозатраты работника во время трудового процесса и коэффициент теплоизоляции выданной спецодежды [7-9].

Каждая ткань обладает определенными свойствами, которые позволяют пропускать или сохранять тепло, тем самым обеспечивая определенный уровень теплового комфорта [10-12]. Комфорт считается фундаментальным свойством при оценке текстильного изделия. Комфортные характеристики тканей в основном зависят от структуры, видов используемого сырья, веса, воздухопроницаемости, плотности, теплопередачи и способности ткани поглощать выделенную телом влагу [13,14].

Передача тепла от тела, заключенного в защитный костюм, к окружающей среде зависит от следующих параметров [15]:

1. Термического сопротивления передаче тепла с поверхности материала.
2. Термостойкости материала одежды.
3. Термического сопротивления воздушной прослойки.

Средние значения теплопроводности, теплопоглощения и термостойкости для тканевых материалов представлены в таблице 1 [16].

Таблица 1 – Основные характеристики теплопроводности, теплопоглощения и термостойкости для тканевых материалов, используемых при изготовлении одежды

Состав материала	Теплопроводность (Вт/м·К)	Теплопоглощение (Вт/(м <sup>2</sup> ·К))	Термостойкость (Вт/(м·К))
100% хлопок	0,052	208,40	0,00794
65% полиэстер 35% хлопок	0,00377	167,80	0,00737
50% полиэстер 50% хлопок	0,03870	137,80	0,01037
66% полиэстер 33% хлопок 1% карбон	0,03890	151,40	0,00851
99% полиэстер 1% карбон	0,033	203,20	0,00372

В таблице 2 представлены толщины часто

используемых тканей для производства защитных костюмов работников нефтяной промышленности.

Таблица 2 – Стандартная толщина ткани защитного костюма работников нефтяной промышленности

Состав тканевого материала	Толщина (мм)
100% хлопок	0,41
65% полиэстер 35% хлопок	0,28
50% полиэстер 50% хлопок	0,40
66% полиэстер 33% хлопок 1% карбон	0,33
99% полиэстер 1% карбон	0,13

Для создания защитного костюма, который мог бы полностью обеспечить требуемый тепловой комфорт рабочего, выполняющего трудовые функции в широком температурном диапазоне на открытой местности, очень важно учесть не только параметры, представленные выше, но и *CLO* – единицу теплоизоляции защитного костюма и одежды в целом:

$$1 \text{ CLO} = 0,155 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}. \quad (1)$$

Значение *CLO* во многом определяется по теплосопrotивлению воздуха между волокнами одежды и воздухом непосредственно под одеждой. Толщина воздушного слоя под одеждой меняется в зависимости от принимаемой позы при выполнении работы.

*CLO* материалов, используемых в современных защитных костюмах, представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Значения показателя *CLO* для разных материалов [17]

Состав тканевого материала	Толщина (мм)
100% хлопок	0,41
65% полиэстер 35% хлопок	0,28
50% полиэстер 50% хлопок	0,40
66% полиэстер 33% хлопок 1% карбон	0,33
99% полиэстер 1% карбон	0,13

Для того, чтобы создать защитный костюм, который будет учитывать все вышеизложенные показатели и обеспечивать требуемый тепловой комфорт, необходимо проводить предварительные расчеты согласно методике П.О. Фангера. В данной методике тепловое состояние оценивается по 7-бальной шкале. Рассматривается температурный диапазон от -3 до +3 баллов [18]. Нижняя граница соответствует ощущению работником холода, озноба, верхняя граница – ощущению тепла, жары.

*Predicted Mean Vote (PMV)* – показатель теплового комфорта находится путем объемных расчетов, учитывающих энергозатраты работника, коэффициент теплоизоляции одежды и климатические условия местности, в которой выполняются работы.

**Результаты.** Показатели теплового комфорта зависят не только от климатических условий, при которых выполняется работа, но и от уровня

физической активности сотрудника. Чем больше энергозатрат использует работник, тем больше тепла вырабатывается в организме человека.

В исследовании принимали участие мужчины – работники буровых установок, возраст которых варьировался от 25 до 50 лет. Общая численность исследуемой группы составила 10 человек. Перед началом эксперимента проводилось анкетирование для определения физиологических параметров каждого участника, а также измерялась частота сердечных сокращений.

При выполнении ими своих трудовых обязанностей не должно быть отвлекающих факторов, так как работы

на буровых установках являются одними из самых опасных профессий. Также нельзя допускать потери внимательности и снижение трудоспособности из-за ощущения тепла или холода и появления вследствие этого чувства дискомфорта, что может привести к угрозе здоровья и жизни работника [19].

Исследование заключалось в следующем: для анализа выбрали 2 костюма, подходящие для работников буровых установок. Данный вид деятельности характеризуется высокой двигательной активностью – 174 Вт.

В качестве условий работы были взяты: температура +12°C, ветер 1 м/с.

Показатели, необходимые для сравнения тепловых качеств одежды, были рассчитаны как (аналитические выражения 2-5) [18, 20]:

$$PMV = [0,303 \exp(-0,036M) + 0,028 \cdot (M-W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99 \cdot (M-W) - p_a] - 0,42 \cdot [(M-W) - 58,15] - 1,7 \cdot 10^{-2} \cdot M(5867 - p_a) - 0,0014 \cdot M(34 - t_a) - 3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a)] \quad (2)$$

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028(M-W) - I_{cl} \cdot \{3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} [-(\bar{t}_r + 273)^4] + f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a)\}, \quad (3)$$

$$h_c = \begin{cases} 2,38 |t_{cl} - t_a|^{0,25}, & \text{если } 2,38 |t_{cl} - t_a|^{0,25} > 12,1 \sqrt{v_{ar}}, \\ 12,1 \sqrt{v_{ar}}, & \text{если } 2,38 |t_{cl} - t_a|^{0,25} < 12,1 \sqrt{v_{ar}}, \end{cases} \quad (4)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,290 I_{cl}, & \text{если } I_{cl} \leq 0,078 \text{ м}^2\text{К/Вт}, \\ 1,05 + 1,645 I_{cl}, & \text{если } I_{cl} > 0,078 \text{ м}^2\text{К/Вт}, \end{cases} \quad (5)$$

где  $M$  – скорость обмена веществ, Вт/м<sup>2</sup> [19];

$W$  – эффективная механическая энергия, Вт/м<sup>2</sup> (при работах на открытой местности эта энергия принимается равной 0);

$I_{cl}$  – коэффициент теплоизоляции одежды, м<sup>2</sup>•К/Вт;

$f_{cl}$  – коэффициент площади поверхности одежды;

$t_a$  – температура воздуха на открытой местности, °С;

$\bar{t}_r$  – средняя температура излучения на открытой местности, °С;

$v_{ar}$  – скорость движения воздуха на открытой местности, м/с;

$p_a$  – парциальное давление водяного пара, [21] Па;

$h_c$  – коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м<sup>2</sup>•К);

$t_{cl}$  – температура поверхности одежды, °С;

$A$  – возраст работника, лет;

$P$  – масса работника, кг.

В таблице 4 приведены промежуточные значения, используемые для расчета показателя  $PMV$ .

Таблица 4 – Промежуточные значения, используемые для расчета показателя  $PMV$

Величина	Значение		Единица измерения
$M = (41,7 - 0,22A) \cdot p^{0,666}$	174		Вт/м <sup>2</sup>
$W$	0		Вт/м <sup>2</sup>
$I_{cl}$ (по формуле 1)	0,078	0,012	м <sup>2</sup> •К/Вт
$f_{cl}$ (по формуле 5)	1,10	1,07	–
$t_a$ [21]	+12		°С
$\bar{t}_r$ [21]	20		°С
$v_{ar}$ [21]	1		м/с
$p_a$ [21]	550		Па
$h_c$ (по формуле 4)	12,1		Вт/(м <sup>2</sup> •К)
$t_{cl}$ (по формуле 3)	3,4	4,3	°С

Результаты проведенных расчетов, а также данные о спецодежде, взятые из открытых источников – сайтов изготовителей, указаны в таблице 5.

**Обсуждение.** При рассмотрении выполняемых работниками функций костюм 1 кажется наиболее функциональным, так как защищает от большего количества ОВПФ, подобные костюмы можно использовать в большем диапазоне климатических поясов.

Однако расчеты показали, что данный костюм уступает второму по показателю теплового комфорта.

Полученные результаты расчета сопоставляются с имеющимися значениями  $CLO$  для материалов, которые используются в костюмах. Предположив линейный характер зависимости  $PMV-CLO$ , пересечение с линией комфортного состояния человека позволяет судить о тепловом комфорте или дискомфорте человека (рис. 1).

Таблица 5 – Сравнение исследуемых костюмов по критериям  $CLO$  и  $PMV$

Параметры сравнения	Костюм №1	Костюм №2
Внешний вид защитного костюма		
Основные виды защит, которые обеспечиваются одеждой, от воздействия ОВПФ (заявлено производителем)	Общие Для защиты от нефти и нефтепродуктов, кратковременного воздействия открытого пламени, общих производственных загрязнений при выполнении работ на взрывоопасных объектах	
Основные виды защит, которые обеспечиваются одеждой, от воздействия ОВПФ (заявлено производителем)	Дополнительно Для защиты от масел, жиров, статического электричества	Дополнительные свойства отсутствуют
Климатический пояс	I-II, III	I-II
$CLO$ (см. сертификат соответствия)	0,5	0,75
$PMV$	-1,34	-0,48
Вывод	Ощущает холод	Комфортно

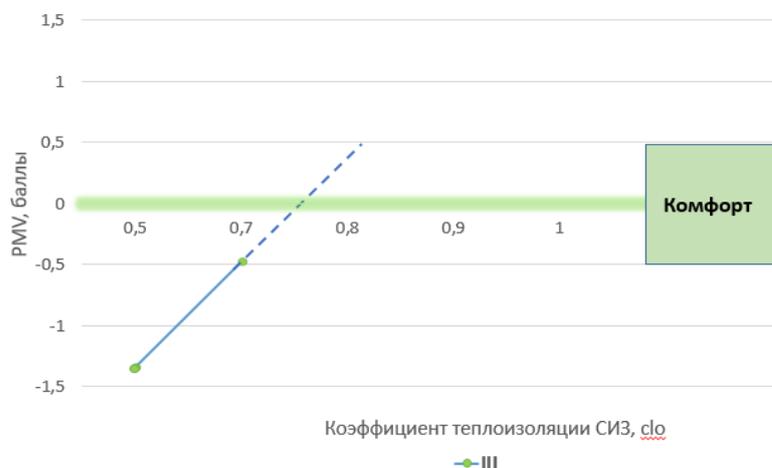


Рисунок 1 – Зависимость состояния теплового комфорта работников от коэффициента теплоизоляции комплекта СИЗ

**Выводы.** Исходя из расчётов определили, что у костюма №1  $PMV = -1.34$ , а у костюма №2  $PMV = -0.48$ . Согласно таблице Национального стандарта РФ, полученные значения показывают,

что в костюме №1 работник при температуре +12 градусов и ветре 1 м/с будет ощущать холод и чувствовать озноб, а в костюме №2 – ощущение комфорта. Следовательно, при выборе спецодежды

второй вариант предпочтительнее, несмотря на то, что согласно информации производителя, оба этих костюма подходят для выбранного в качестве условий работы климатического пояса.

Таким образом, показатель *PMV-CLO* позволяет обосновать выбор необходимой спецодежды для работы на открытой местности определенного климатического пояса.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Постановление Правительства РФ от 24.12.2021 N 2464 «О порядке обучения по охране труда и проверки знаний требований охраны труда».

2. Каверзнева, Т.Т. Инновационное направление подготовки высококвалифицированных кадров инженерно-технического профиля / Т.Т. Каверзнева, И.Л. Скрипник, Ю.Г. Ксенофонтов // Учитель создает нацию (А. Кадыров): Сборник материалов V международной научно-практической конференции, Грозный, 25 ноября 2020 года. – Махачкала - Грозный: Издательство «АЛЕФ», 2020. – С. 63-66. – EDN VM-PWKD.

3. Каверзнева, Т.Т. Разработка методики оценки профессионального риска работников нефтяного промысла / Т.Т. Каверзнева, Е.А. Сычева // Безопасность в чрезвычайных ситуациях: сборник научных Всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 19–21 апреля 2018 года / Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2018. – С. 23-29.

4. Приказ Минтруда России от 29.10.2021 N 767н «Об утверждении Единых типовых норм выдачи средств индивидуальной защиты и смывающих средств» (Зарегистрировано в Минюсте России 29.12.2021 N 66671) [Электронный ресурс]. – URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_405226/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_405226/) (дата обращения 06.03.2022).

5. Оптимизация обучения и проверки знаний требований охраны труда с помощью интернет-технологий / В.А. Сенченко, Т.Т. Каверзнева, В.И. Салкуцан [и др.] // Безопасность жизнедеятельности. – 2020. – № 8(236). – С. 49-55.

6. Новые подходы в организации системы обучения и проверки знаний требований охраны труда в организациях / В.А. Сенченко, Т.Т. Каверзнева, Н.В. Румянцева, Н.А. Леонов // Безопасность и охрана труда. – 2020. – № 1(82). – С. 73-76.

7. Marszałek, A., Bartkowiak, G., Dąbrowska, A., Krzemińska, S., Łęzak, K., Makowski, K., & Bugajska, J. (2018). Mine rescuers' heat load during the expenditure of physical effort in a hot environment, using ventilated underwear and selected breathing apparatus. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 24(1), 1-13.

8. Golod, V.A., Rudakov, M.L., Stepanova, L.V. Substantiation of the parameters of personal protective equipment of the employees for ensuring thermal comfort of the coal mines underground personnel (2019) *Bezopasnost' Truda v Promyshlennosti*, 2019 (5), pp. 52-58.

9. Joshi, A. Pedagogical Monitoring of the Professional Image Formation among Technosphere Safety Students / N. Leonova, T. T. Kaverzneva, C. V. Pshenichnaya, I. L. Skrypnik // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vladivostok, 06–09 октября 2020 года. – Vladivostok, 2021. – P. 032027. – DOI 10.1088/1755-1315/666/3/032027. – EDN LPYEYV.

10. Wang, F., Kang, Z., Yang, B., & Zhao, D. (2022). A three-dimensional thermoregulatory model for predicting human thermophysiological responses in various thermal environments. *Building and Environment*, 207 doi:10.1016/j.buildenv.2021.108506

11. Zhang, Y., Chen, C., Lin, J., Zhang, S., Shoichi, K., & Yan, Z. (2021). Cold tolerance characteristics of human body in severely cold environments. *Harbin Gongye Daxue Xuebao/ Journal of Harbin Institute of Technology*, 53(12), 164-170. doi:10.11918/202005008

12. Kamarul Aini, M. S., Wan Noor Hanani, W. Z., Mohd Arif,

R., Nor Haslina, H., Nur Aini, M. A., & Haris Fadzillah, H. (2019). Thermal comfort study at dewan sultan ibrahim, UTHM. Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 373(1) doi:10.1088/1755-1315/373/1/012012

13. Liu, L., Chen, C., Wang, Z., Zhu, H., & Jin, Y. (2019). Thermal-moisture comfort of multilayered fabric systems used as firefighting clothing. *Fangzhi Xuebao/Journal of Textile Research*, 40(5), 119-123. doi:10.13475/j.fzxb.20180703105

14. Mandal, S., Camenzind, M., Annaheim, S., & Rossi, R. M. (2017). Testing of hot-water and steam protective performance properties of fabrics. *Advanced characterization and testing of textiles* (pp. 211-235).

15. Khammatova, V.V., & Razumeev, K.E. (2019). Research of tissue resistance of special purpose after action of acid and oil. [Исследование стойкости тканей специального назначения после воздействия кислоты и нефти] *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'Noi Promyshlennosti*, (3), 45-47. Ivashcheko, I.N., Usatkov, S.V., & Shmalko, S.P. (2016). Optimization.

16. Pamuk, O., Ondoçjan, Z., & Abreu, M. J. (2009). The thermal comfort properties of reusable and disposable surgical gown fabrics. *Tekstilec*, 52(1-3), 24-30.

17. Практикум по моделированию и конструированию одежды: учебное пособие / под ред. В.Кузьмичева. – Иваново: ИВГПУ, 2014. – 576 с.

18. ГОСТ Р ИСО 7730-2009 Эргономика термальной среды. [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200076557> (дата обращения 06.03.2022).

19. Скрипник, И.Л. Применение комплексного показателя технического уровня и его основных составляющих для выбора лучшего изделия / И.Л. Скрипник, С.В. Воронин, Т.Т. Каверзнева // Научно-аналитический журнал Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. – 2020. – № 1. – С. 60-68. – EDN FPFNC.

20. Степанова, Л.В. Обоснование параметров средств индивидуальной защиты работников для обеспечения теплового комфорта подземного персонала угольных шахт [Текст]: дис. ... канд. техн. наук : 05.26.01 / Л.В. Степанова. – Санкт-Петербург, 2019. – 116 с.

21. СП 131.13330.2020 Строительная климатология СНиП 23-01-99 // М.: Стандартинформ, 2021.

*Статья поступила в редакцию 11.07.2022*

*Статья принята к публикации 16.09.2022*

УДК 614.8.015

DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0025

**ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРИ РАСЧЕТАХ  
ПО ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

© Авторы. 2022

SPIN: 1947-0874

AuthorID: 665606

ORCID: 0000-0001-9259-1984

**РОМАНЕНКО Александр Иванович**, кандидат технических наук, доцент*Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского  
(109004, Россия, Москва, улица Земляной Вал, 73, e-mail: rai-52@mail.ru)*

SPIN: 4661-7893

AuthorID: 448097

ORCID: 0000-0001-8621-0604

**ТАРАКАНОВА Валентина Викторовна**, кандидат педагогических наук, доцент*Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского  
(109004, Россия, Москва, улица Земляной Вал, 73, e-mail: walentt@yandex.ru)*

SPIN: 2956-1736

AuthorID: 549140

ORCID: 0000-0001-90-54-6178

ResearcherID: GNW-2462-2022

ScopusID: 57217137441

**ТЕРТЫЧНАЯ Светлана Вячеславовна**, кандидат технических наук, доцент*Пензенский государственный университет  
(440006, Россия, Пенза, улица Красная, 40, e-mail: svetter@mail.ru);  
Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского  
(440006, Россия, Пенза, улица Володарского, 6, e-mail: svetter@mail.ru)*

**Аннотация.** Для расчета сил и средств в условиях чрезвычайных ситуаций, связанных с пожарами, очень удобно использовать готовые программные продукты, позволяющие в автоматизированном режиме безошибочно делать выводы. Данный вид компьютерных программ имеет ряд особенностей, требующих учета информации, касающейся места расположения возгораний, материалов, подвергшимся горению и т.д. Введение данных переменных осуществляется «в ручном режиме», однако можно предусмотреть возможность наихудшего развития ситуации для конкретного объекта и создать своего рода «справочную базу». Безусловно, можно использовать «паспорта безопасности», которые уже существуют на промышленных объектах, добавив к ним наиболее жесткие условия развития горения. Создавая подобную базу для всех объектов инфраструктуры населенного пункта можно переходить к фазе моделирования сложных ситуаций и выявлять наименее защищенные места и делать соответствующие выводы. Предлагаемый комплекс программного обеспечения по расчетам в области пожарной безопасности включает в себя ряд программ, написанных по стандартным методикам, применяемым в настоящее время в подразделениях МЧС. Основу программного комплекса составляет расчетная часть по требуемым силам и средствам на тушение пожара. Применение программных продуктов возможно, как в виде отдельных программ для конкретных расчетов, например в эвакуационных расчетах при пожаре, так и задав полные параметры здания и прилегающей территории, осуществить весь комплекс вычислений.

**Ключевые слова:** программное обеспечение, пожарный риск, расчет сил, расчет средств, возгорания, автоматизированный комплекс.

**SOFTWARE APPLICATION FOR FIRE SAFETY CALCULATIONS**

© The Author(s) 2022

**ROMANENKO Alexander Ivanovich**, candidate of technical sciences, associate professor**TARAKANOVA Valentina Viktorovna**, candidate of pedagogical sciences, associate professor*Moscow State University of Technology and Management named after K.G. Razumovsky  
(109004, Russia, Moscow, Zemlyanoy Val Street, 73, e-mails: rai-52@mail.ru, walentt@yandex.ru)***TERTYCHNAYA Svetlana Vyacheslavovna**, candidate of technical sciences, associate professor*Penza State University  
(440006, Russia, Krasnaya Street, Penza, 40, e-mail: svetter@mail.ru)  
Moscow State University of Technology and Management named after K.G. Razumovsky  
(440006, Russia, Penza, Volodarsky Street, 6, e-mail: : svetter@mail.ru)*

**Abstract.** To calculate the forces and means in emergency situations associated with fires, it is very convenient to use ready-made software products that allow you to accurately draw conclusions in an automated mode. This type of

computer programs has a number of features that require taking into account information regarding the location of fires, materials that have undergone combustion, etc. The introduction of these variables is carried out "in manual mode", however, it is possible to foresee the possibility of the worst possible development of the situation for a particular object and create a kind of "reference base". Of course, it is possible to use the "safety passports" that already exist at industrial facilities, adding to them the most stringent conditions for the development of combustion. By creating such a base for all infrastructure facilities of a settlement, it is possible to proceed to the phase of modeling complex situations and identify the least protected places and draw appropriate conclusions. The proposed software package for calculations in the field of fire safety includes a number of programs written according to standard methods currently used in the subdivisions of the Ministry of Emergency Situations. The basis of the software package is the calculation part for the required forces and means for extinguishing a fire. The use of software products is possible, both in the form of separate programs for specific calculations, for example, in evacuation calculations in case of fire, and by setting the full parameters of the building and the surrounding area, to carry out the entire complex of calculations.

**Keywords:** software, fire risk, calculation of forces, calculation of means, fires, automated complex.

*Для цитирования:* Романенко А.И. Применение программного обеспечения при расчетах по пожарной безопасности / А.И. Романенко, В.В. Тараканова, С.В. Тертычная // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022. – Т. 11. – № 3(59). – С. 165-169. – DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0025.

**Введение.** Обеспечение пожарной безопасности является первоочередной задачей в любой сфере человеческой деятельности, в равной степени как на производстве, так и при организации компактного проживания граждан [1-4]. Мероприятия по организации и поддержанию противопожарного режима являются обязательными к исполнению, однако регулярно наблюдаются различного рода нарушения, приводящие к трагическим последствиям. В настоящее время вопросам организации противопожарного режима стало уделяться довольно много внимания и связано это с тем, что по стране прокатилась волна серьезных крупных пожаров, унесших человеческие жизни [5-9]. В ближайшем будущем, к сожалению, нет гарантии того, что подобные трагедии не смогут повториться, а значит, к ним надо быть готовым, но при этом максимально снижать вероятность возникновения чрезвычайной ситуации.

Разработанный программный комплекс позволяет быстро и качественно рассчитать основные показатели для организации мер сдерживания распространения пламени, а также рассчитать скорость эвакуации из здания, задымленность и ряд других параметров, имеющих отношение к противопожарным мероприятиям в условиях чрезвычайной ситуации.

Применение программного комплекса рассчитано как на специалистов МЧС, так и готово к использованию в обучающих целях для студентов и слушателей соответствующих направлений подготовки.

**Методология.** Целью работы заключалась в создании программного обеспечения для расчетов в области пожарной безопасности. Данное программное обеспечение применимо как в подразделениях МЧС, так и при обучении студентов соответствующего профиля подготовки в высших учебных заведениях.

В основу программного комплекса положена идея о необходимости комплексного подхода к расчетам широкого диапазона данных в области пожарной безопасности. При этом, вводя данные о

конкретном объекте один раз, можно получить весь спектр расчетов, касающихся как ведения аварийно-спасательных работ, так и предупредительных мероприятий.

В ходе работы ставился ряд задач, направленных на автоматизацию расчетов по пожарной безопасности. Был составлен целый комплекс программного обеспечения, состоящий из отдельных пакетных программ. Отдельные программы обеспечивают расчет только одного направления, например, только расчет потребности в силах и средствах или расчет потребности в подвозе пожаротушащих средств при отсутствии возможности «постановки автомобиля на водосточник» и т.д.

Все программы написаны в едином стиле на языке объектного программирования *Delphi*.

За основу расчета взята «Методика проведения пожарно-тактических расчетов», применяемая для использования в МЧС, а также информационно-техническая литература расчетного характера [10-15].

**Результаты.** Использование компьютерной программы значительно сокращает время для проведения расчетов. Данная программа является составной частью комплекса программ по расчетам в области пожарной безопасности. Использование данного комплекса является существенным подспорьем при составлении планов ликвидации пожаров. Применение программ как в комплексе, так и по отдельности используется при обучении студентов направления «Пожарная безопасность» и «Техносферная безопасность» [16-17].

Рассмотрим, к примеру, программу по обеспечению бесперебойной подачи огнетушащего средства (воды) из имеющегося открытого водосточника. Данная программа осуществляет ряд внутренних расчетов, а именно:

- расчет максимально возможного расстояния от места пожара до головной пожарной машины ( $N_{гол}$ );
- расстояние перекачки между пожарными автомобилями ( $N_{мм}$ );
- общее количество ступеней перекачки (их число  $N_{ст}$ );

- расчет числа пожарных машин для перекачки ( $N_{avi}$ )
- фактическое расстояние до пожара и головной машины ( $N_{fact}$ ).

Программа имеет удобный интуитивно понятный интерфейс (рис. 1). На первом этапе выполняется ввод исходных данных, учитывающих особенности объекта.

Описание переменных:

$H_n = 90 \div 100$  м – напор на насосе АЦ,

$H_{разв} = 10$  м – потери напора в разветвлении и рабочих рукавных линиях,

$H_{ст} = 35 \div 40$  м – напор перед стволом,

$H_{input} \geq 10$  м – напор на входе в насос следующей ступени перекачки,

$Z_m$  – наибольшая высота подъема (+) или спуска (–) местности (м),

$Z_{ct}$  – наибольшая высота подъема (+) или спуска (–) стволов (м),

$S$  – сопротивление одного пожарного рукава,

$Q$  – суммарный расход воды в одной из двух наиболее загруженной магистральной рукавной линии (л/с),

$L$  – расстояние от водоисточника до места пожара (м),

$N_{рук}$  – расстояние от водоисточника до места пожара в рукавах (шт.).

Рисунок 1 – Ввод данных с выбором рельефа местности

Рельеф местности может иметь подъём, тогда программа направляет движение вычислений по условию  $Relief=0$ , при спуске выполняется условие:  $Relief=1$ .

Ниже представлен код программы для обработки выбранного рельефа местности:

```
Relief := ComboBox1.ItemIndex;
if Relief=0 then
  Begin
    Ngol:= (Hn- (Hrazv+Hct+Zm+Zc-
t) )/S*sqr(Q);
    Lgol:= ((Hn- (Hrazv+Hct+Zm+Zc-
t) )/S*sqr(Q) ) *20;
    Nmm := (Hn- (Hinput+Zm) ) / S*sqr(Q);
    Lmm := ((Hn- (Hinput+Zm) )/S*sqr(Q) ) *20
  End
Else
  if Relief=1 then
  Begin
    Ngol:= (Hn- (Hrazv+Hct-Zm-Zct) ) /
S*sqr(Q);
    Lgol:= ((Hn- (Hrazv+Hct-Zm-Zct) ) /
S*sqr(Q) ) *20;
    Nmm := (Hn- (Hinput-Zm) ) / S*sqr(Q);
    Lmm := ((Hn- (Hinput-Zm) )/S*sqr(Q) ) *20
  End
```

```
Else
  Begin
    S2 := 'Выберите рельеф местности';
    MessageDlg(S2, mtWarning, [mbOk], 0);
    ActiveControl:= ComboBox1;
    exit;
  end;
```

Выбрав рельеф местности, оператор производит ввод дополнительных параметров исходя из реальных данных, имеющихся в наличии. Дальнейшие действия оператора сводятся к анализу полученной информации и внесению результатов в соответствующие документы (рис. 2).

Полученные результаты являются составной частью полного расчета с использованием комплекса программного обеспечения. Предыдущими этапами является полный расчет сил и средств, привлекаемых для ликвидации возгораний, возможности тушения без использования водоисточника и с установкой автомобиля на водоисточник. Кроме того, программное обеспечение позволяет рассчитать расходы различных огнетушащих средств (вода, пена и т.д.), рассмотреть варианты с подвозом воды пожарными машинами и/или использование гидроэлеваторных систем.

Параметр	Значение
Вид местности до источника воды	Подъём
Наибольшая высота подъёма или спуска	0
Z ст	10
Нн	90
Н разв.	10
Н ст.	35
Н вх.	10
S	0,015
Q	10,5
L	1500
N рук.	90

**Вывод результата**

**Ngol = 257250**  
**Lgol = 5145000**  
**Nmm = 588000**  
**Lmm = 11760000**  
**Nct = -0,437**  
**Navt = 0,563**  
**Nfact = 257046**

Рисунок 2 – Вывод результатов расчета

Таким образом, программное обеспечение охватывает все основные расчеты, связанные с организацией пожаротушения и анализ полученных результатов ложится в основу ликвидационного плана. Подобные данные могут являться основанием для разработки предупреждающих и корректирующих действий и обеспечения максимальной защиты объекта. Результаты расчета наглядно показывает все сложности ликвидации чрезвычайной ситуации.

Процесс проведения расчетов по всем вышеперечисленным пунктам полного комплекта программного обеспечения, в среднем, занимает около 10-15 минут, с учетом времени на введение исходных данных и выбора требуемых параметров. В результате получается комплекс расчетов по конкретному объекту.

**Обсуждение.** Автоматизация процесса расчетов в сфере пожарной безопасности позволяет исключить вероятность ошибки оператора, экономит много времени и позволяет систематизировать информацию благодаря системе хранения и быстрого доступа к ней. Считаем, что знакомство с программой должно происходить уже на стадии обучения студентов в высших учебных заведениях. Применение программных продуктов в обучающих целях экономит время на самих вычислениях, давая возможность студентам грамотно осуществлять поиск наиболее оптимальных вариантов, производить их сравнение и анализ. Самым интересным являются занятия, связанные с выездом на местность с последующим моделированием ситуации. Здесь студентам представляется возможность проверить реальность выполненных расчетов, проанализировать свои выводы. Такие занятия имеют еще и серьезный психологический аспект, оказывая влияние на

понимание важности проведения подобных расчетов и внимательного отношения к деталям. Кроме того, освоение программного комплекса, еще на базе учебного заведения, позволит будущим сотрудникам МЧС быстрее адаптироваться на своих рабочих местах.

Применение программного продукта по противопожарным расчетам – серьезное подспорье в работе сотрудников МЧС и специалистов в области обеспечения противопожарной защиты на хозяйствующих объектах. Значительная часть произведенных в программном комплексе расчетов включается в «Паспорт безопасности объекта» и служит основанием для предупреждения и ликвидации чрезвычайной ситуации.

**Выводы.** Важность приведенного программного продукта сомнений не вызывает, так как существует реальная потребность в автоматизации многочисленных вычислений по пожарной безопасности. Для студентов, применение программного комплекса на занятиях, дает возможность рассмотреть разные варианты и позволяет без потери времени смоделировать различные ситуации. Кроме того, автоматизация процесса вычислений позволяет исключить пресловутый «человеческий фактор» и избежать случайных арифметических и логических ошибок.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Чешко И.Д. Расследование и экспертиза пожаров Под науч. ред. канд. юр. наук Н. А. Андреева. – 2-е изд., стереотип. – СПб.: СПбГИПБ МВД России, 1997. – 562 с.
2. Драгин В.А., Нормов Д.А. Порядок определения величин пожарного риска для объектов производства: монография / Драгин В.А., Нормов Д.А. – Краснодар: КСЭИ, 2015. – 88 с.
3. Брушлинский Н.Н. Пожарная статистика: Учебное

пособие / Н.Н. Брушлинский, С.В. Соколов. – М.: Академия МЧС России, 2017. – 107 с.

4. Терещев В.В. Справочник руководителя тушения пожара. Тактические возможности пожарных подразделений. - ИБС-Холдинг, 2005. – 248 с.

5. 25. К.Н. Степанов, Я.С. Повзик, И.В. Рыбкин Пожарная техника. - М.: ЗАО «СПЕЦТЕХНИКА», 2003. – 400 с.

6. Казаков В.А., Виноградов О.С., Виноградова Н.А., Наумов Л.В., Макришина М.В. Предупреждение чрезвычайных ситуаций в электрохимических производствах // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2012. – №1. – С. 52-57.

7. НПБ 301-2001 Техника пожарная. Дымососы переносные пожарные. Общие технические требования. Методы испытаний. - ГУГПС МВД России, 2001.

8. Виноградов О.С., Виноградова Н.А., Гуляева Э.Ю., Полудняков А.И. Программное обеспечение по расчету уровня загрязнения при техногенных авариях // Сурский вестник. – 2019. – № 2 (6). – С. 31-33.

9. Собурь С.В. Пожарная безопасность предприятия: Курс пожарно-технического минимума: Учебно-справочное пособие / С.В. Собурь. – М.: ПожКнига, 2017. – 480 с.

10. Порядок тушения пожаров подразделениями пожарной охраны, утвержденный приказом МЧС России от 31 марта 2011 г. – № 156.

11. Методические рекомендации руководителю тушения пожара по организации и проведению тактической вентиляции зданий и сооружений при тушении пожаров и ликвидации последствий ЧС на территории города Москвы. – М.: ГУ МЧС России по г. Москве, 2014. – 78 с.

12. Баныщикова З.Е., Близнюк М.С., Глебов В.Ю., Иванов В.С., Курличенко И.В., Назаренко Е.К., Руденко А.В., Савченков С.Н., Сломянский В.П., Федосеева О.С. Справочное пособие по организации выполнения мероприятий по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций и проведению аварийно-спасательных работ силами и средствами органов государственной власти, органов местного самоуправления в мирное и военное время / МЧС России. М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2016. – 528 с.

13. Радоуцкий В.Ю. Организация и ведение аварийно-спасательных работ: учеб. пособие / В.Ю. Радоуцкий, В.П. Полуянов; под ред. В.Ю. Радоуцкого. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2010. – 156 с.

14. Онищенко В.Я. Классификация и сравнительная оценка факторов риска // Безопасность труда в промышленности. – №7. – 2013. – С. 23-27.

15. Тихомиров О.И. Пособие по пожарной безопасности. – М.: НЦ ЭНАС. – 2014. – 64 с.

16. Виноградов О.С., Виноградова Н.А., Кадакина Н.А., Малокова И.О. Подготовка специалистов в области «Техносферной безопасности» в высшей школе // В сборнике: Актуальные проблемы физики и технологии в образовании, науке и производстве Материалах Всероссийской научно-практической конференции. – 2019. – С. 176-179.

17. Vinogradov O.S., Vetlugina G.P., Zaitsev V.Yu., Kaleda I.A., Koroleva T.I., Vochkareva L.P. Theoretical and Methodological Background to Environmental Training of Students of Technosphere and Fire Safety Profile // Proceedings of the International Symposium “Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research” (ISEES 2018), 2018, – P. 80-84.

*Статья поступила в редакцию 22.07.2022*

*Статья принята к публикации 16.09.2022*

УДК 519.876.5

DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0026

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА И ОЦЕНКИ  
ПОЖАРНОГО РИСКА ЗДАНИЯ**

© Авторы 2022

SPIN: 4702-5955

AuthorID: 618777

ORCID: 0000-0002-5531-3579

ResearcherID: F-2232-2018

ScopusID: 57212562000

**АВДЕЕВА Марина Олеговна**, кандидат экономических наук,  
доцент Высшей школы техносферной безопасности

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*  
(195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, e-mail: avdeeva\_mo@spbstu.ru)

SPIN: 3204-6018

AuthorID: 831170

ORCID: 0000-0002-6725-7340

ResearcherID: AAF-4709-2019

ScopusID: 57218102410

**УЗУН Олег Леонидович**, кандидат юридических наук, доцент Высшей школы техносферной безопасности  
*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*

(195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, e-mail: uzun\_ol@spbstu.ru)

SPIN: 8286-5957

AuthorID: 805309

ORCID: 0000-0002-0567-3875

ResearcherID: Q-4441-2017

ScopusID: 57205428468

**ДОРОНИН Александр Сергеевич**, ассистент Высшей школы техносферной безопасности  
*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*

(195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, e-mail: doronin\_as@spbstu.ru)

**ЗАГЛЯДИМОВ Константин Игоревич**, студент Высшей школы техносферной безопасности

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*  
(195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, e-mail: zaglyadimov.ki@edu.spbstu.ru)

**Аннотация.** Обеспечение пожарной безопасности считается одной из функций государства, достижение которой путем внедрения нормативно правового регулирования со стороны государства, разработке мероприятий по пожарной безопасности. Однако, несоблюдение этих норм, а также небрежное отношение людей к безопасности и приводят к возникновению пожаров. Проанализировав имеющиеся на данный момент публикации по выбранной теме, авторы пришли к выводу, что данная задача и по сей день не теряет своей актуальности. Целью данного исследования является проведение автоматизированной оценки пожарного риска средствами программного обеспечения *Fenix+* путем построения имитационной модели здания. Определены следующие задачи: а) проанализировать современное состояние пожарной безопасности для высшего учебного заведения, б) на основании проведенных на модели экспериментов получить значения индивидуального пожарного риска, графики и карты распределения опасных факторов пожара, временные значения и количество эвакуировавшихся людей, а также информация о скоплениях, в) провести анализ результатов полученных данных и разработать рекомендаций и мероприятий по снижению пожарного риска. С использованием программного продукта *Fenix2+* реализована 3D модель здания высшего учебного заведения, на которой проведены различные эксперименты. На основе анализа полученных результатов авторами статьи были сформулированы предложения по повышению безопасности здания.

**Ключевые слова:** оценка рисков, эвакуация, пожар, анализ и оценка, управление безопасностью жизнедеятельности, моделирование рисков, моделирование, техносферная безопасность, *fenix+*.

**APPLICATION OF THE SIMULATION MODELING METHOD FOR CALCULATING AND  
ASSESSING THE FIRE RISK OF A BUILDING**

© Autor(s) 2022

**AVDEEVA Marina Olegovna**, phd (economic), associate professor of Higher School of Technospheric Safety

**UZUN Oleg Leonidovich**, phd (legal), associate professor of Higher School of Technospheric Safety

**DORONIN Alexander Sergeevich**, assistant at the Higher School of Technosphere Security

**ZAGLYADIMOV Konstantin Igorevich**, student of the Higher School of Technosphere Security

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

(195251, Russia, St. Petersburg, Polytechnic St., 29,

e-mails: avdeeva\_mo@spbstu.ru, uzun\_ol@spbstu.ru, doronin\_as@spbstu.ru, zaglyadimov.ki@edu.spbstu.ru)

**Abstract.** Ensuring fire safety is considered one of the functions of the state, the achievement of which is through the introduction of regulatory regulation by the state, the development of measures for fire safety. However, non-compliance with these standards, as well as people's careless attitude to safety, lead to fires. After analyzing the currently available publications on the chosen topic, the authors came to the conclusion that this task does not lose its relevance to this day. The purpose of this study is to conduct an automated assessment of fire risk by means of *Fenix+* software by building a simulation model of a building. The following tasks are defined: a) to analyze the current state of fire safety for higher educational institutions, b) on the basis of experiments conducted on the model to obtain the values of individual fire risk, graphs and maps of the distribution of fire hazards, time values and the number of evacuated people, as well as information about clusters, c) to conduct analyze the results of the obtained data and develop recommendations and measures to reduce fire risk. Using the *Fenix2+* software product, a 3D model of the building of a higher educational institution was implemented, on which various experiments were carried out. Based on the analysis of the learned results, the authors of the article formulated proposals to improve the safety of the building.

**Keywords:** risk assessment, evacuation, fire, analysis and assessment, life safety management, risk modeling, modeling, technosphere safety, fenix+.

*Для цитирования:* Авдеева М.О. Применение метода имитационного моделирования для расчета и оценки пожарного риска здания / М.О. Авдеева, О.Л. Узун, А.С. Доронин, К.И. Заглядимов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022. – Т. 11. – № 3(59). – С. 170-175. – DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0026.

**Введение.** Обеспечение пожарной безопасности считается одной из функций государства, достижение которой способствует нормативное правовое регулирование и осуществление государственных мер в области по-жарной безопасности, создание пожарной охраны и организация её деятельности, разработка и осуществление мер пожарной безопасности, реализация прав, обязанностей и ответственности в области пожарной безопасности.

На сегодняшний день, чтобы определить необходимые мероприятия по повышению уровня пожарной безопасности проводится оценка пожарного риска на объектах. Оценка пожарного риска – это расчет, выполняемый в соответствии с установленными государством методиками. В результате расчета получается значение индивидуального пожарного риска. Далее происходит сравнение полученного результата с нормативным значением. На основании полученного сравнения делаются выводы об уровне пожарной безопасности в здании.

Множество научных работ, посвящены совершенствованию материалов для повышения огнестойкости зданий. Предлагается использование новых типов бетонных конструкций для повышения прочности зданий и повышению его огнестойкости [1,2]. Рыбаков В., Жувак О., Хоффманн А., Сергеева Ф., Вериги П. в своей работе анализируют поведение армирующих швов при воздействии пожарной нагрузки. В ходе исследования выяснилось, что муфтовые и сварные соединения придают дополнительную жесткость образцам без ухудшения прочностных характеристик арматурного стержня [3]. Внедрение противопожарных завес создаст временные преграды для распространения огня в открытых технологических проемах, проемах зданий и сооружений, а огнезащитный сухой штукатурный состав повысит огнестойкость стен и снизит скорость распространения пожар [4,5]. Никита Левашов,

Марина Акулова и Юлия Соколова для повышения огнестойкости и прочности стен при строительстве предлагают использовать штукатурный раствор с силикатными добавками, когда Татьяна Еремина и Корольченко Дмитрий отдают предпочтение ортофосфорной кислоте, в качестве модифицирующей добавки, на огнезащитных свойствах краски [6,7].

Одним из перспективных направлений в области пожарной безопасности является внедрение системы мониторинга, прогнозирования и моделирования пожаров. Авторы нескольких научных статей уделяют внимание внедрению программного обеспечения *Fenix+* для оценки и прогнозирования пожарного риска [8,9].

Бочка А.А. рассматривает актуальность применения средств контроля и мониторинга пожарных рисков на основе пожарных извещателей, а Сергей Дубов, Игорь Бабиков, Михаил Васильев и Леонид Танклевский разработали метод оперативной диагностики пожарных извещателей, входящих в контур пожарной сигнализации [10,11]. Авторы уделяют внимание разработке нейронных сетей для прогнозирования разрушения здания во время пожаров. [12,13].

В 2020 г. на территории Российской Федерации зарегистрировано 439 394 пожара, из которых 152 127 пожаров произошли в зданиях и сооружениях [14]. Это говорит о том, что имеется необходимость внедрения новых способов оценки пожарного риска или применения новых материалов для снижения шансов возгорания чем и занимаются на сегодняшний день ученые всех стран мира.

Данная работа направлена на проведение оценки пожарного здания высшего учебного заведения. По результатам оценки будут сформированы выводы об уровне пожарной безопасности этажа и предложены решения по повышению безопасности здания.

**Методология.** Оценка пожарного риска на

объектах проводится с целью определения частоты и меры тяжести воздействия опасных факторов пожара на здоровье человека и имущество, чтобы в последствии определить необходимые мероприятия по повышению уровня пожарной безопасности.

Для оценки пожарного риска в качестве программы по оценке рисков будет использоваться “Fenix+”.

“Fenix +” – комплекс программ, разработанный компанией MST инженерное программное обеспечение. Основной целью данного комплекса является расчет пожарного риска зданий и сооружений [15].

Программа имеет графический редактор, позволяет смоделировать структуру и масштаб объекта, а также построить 3D модель здания по заданным чертежам, что позволяет более наглядно наблюдать за результатами моделирования.

Вместе с этим в программу встроены расчетные формулы, позволяющие промоделировать пожароопасную ситуацию и получить результаты темпов распространения пожара и значения опасных

факторы пожара такие как: температура, видимость, задымленность, тепловой поток, содержание опасных для вдыхания продуктов горения в воздухе. Так же “Fenix +” позволяет провести моделирование эвакуации людей беря за основу поведение человека, который во время пожара ищет ближайший выход.

В качестве объекта исследования был выбран 4 этаж высшего учебного заведения. Этаж имеет форму двух перпендикулярно связанных прямоугольников, имеет один основной эвакуационный и один вспомогательный выходы. Планировка коридорного типа с двухсторонним и на некоторых участках односторонним расположением помещений. Освещение достигается в основном за счет множество оконных проемов в наружных стенах, а так же люминисцентных ламп. Согласно плану, высота потолков составляет 3 метра. В каждом кабинете и в коридорах имеется система охранно пожарной сигнализации, однако при этом отсутствует система автоматического пожаротушения (рис. 1).

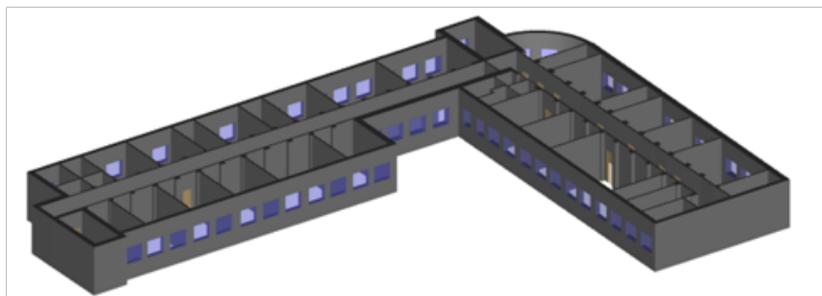


Рисунок 1 – Трехмерная модель этажа

**Результаты.** В соответствии с приказом МЧС от 30.06.2009 № 382 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности» частота реализации пожароопасных ситуаций для высших учебных учреждений равна  $4,2 \cdot 10^{-2}$  по статистическим данным в течение года [16].

Следующий шаг в оценки риска будет выбор сценария развития пожара.

Сценарий развития пожара – это событие, при котором происходит пожар на основании заданных условий и параметров пожара.

В процессе моделирования здания был рассмотрен

следующий сценарий:

Сценарий №1 предполагает возгорание в компьютерном классе (рис. 2). Причиной возгорания может послужить короткое замыкание в одном из системных блоков или одной из розеток, либо перегрев с воспламенением изоляции участка проводов внутри одного из системных блоков. Для сценария обозначим расчетную область и расставим регистраторы, контрольные точки, в которых будут фиксироваться показатели динамики развития пожара, также укажем эвакуационные выходы.

Проведя моделирование данных сценариев в программном продукте Fenix 2+, получим графические распределения опасных факторов пожара (рис. 3).



Рисунок 2 – Сценарий №1

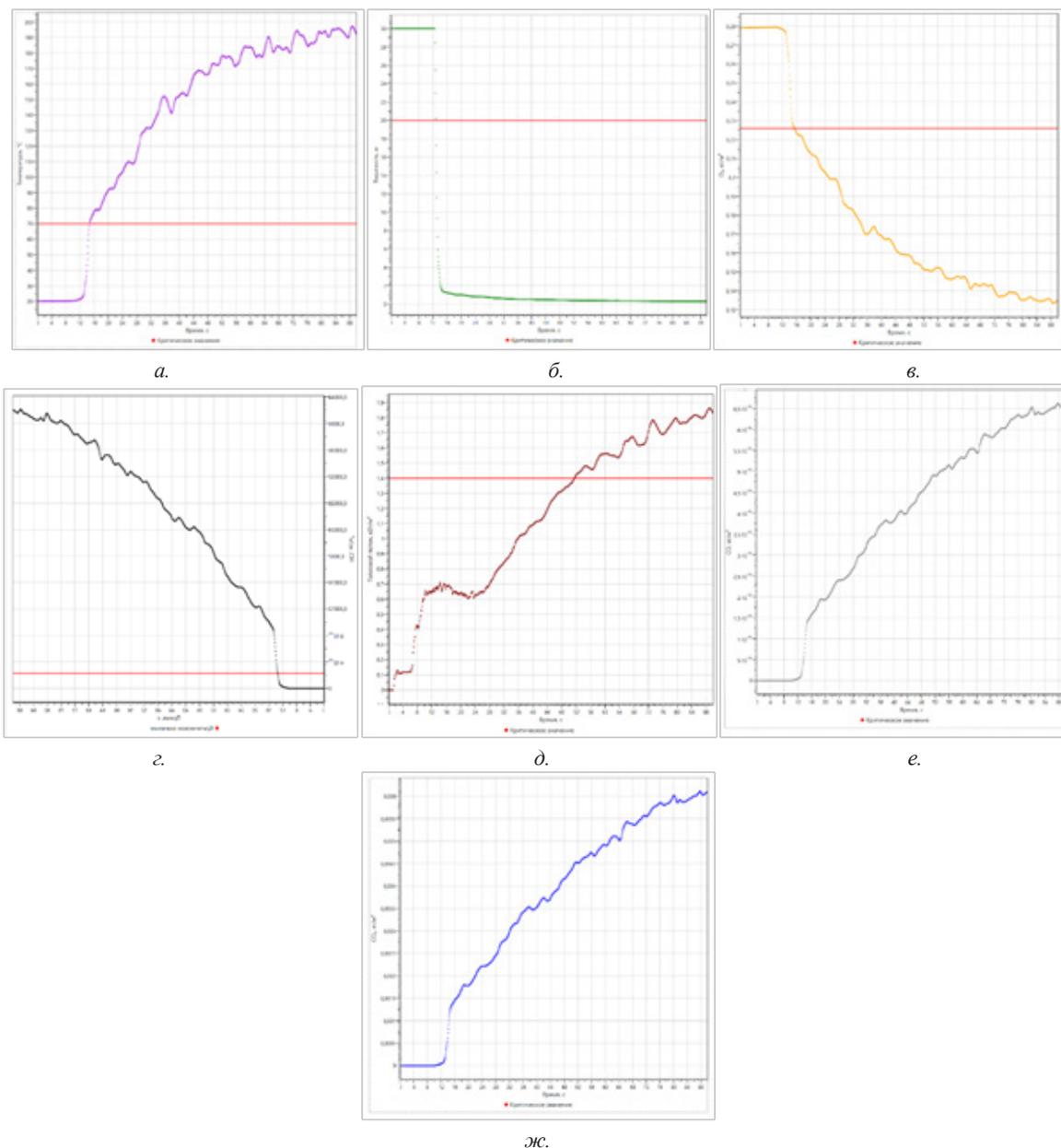


Рисунок 3 – Графические показатели опасных факторов пожара для сценария №1  
 а.-график изменения температуры; б.- график изменения содержания хлороводорода;  
 в.- график изменения видимости; г.- график изменения содержания кислорода;  
 д.- график изменения теплового потока; е. – график изменения монооксид углерода;  
 ж. – график изменения диоксида углерода

**Обсуждение.** Красной полосой на графиках отображен показатель критического значения для опасного фактора пожара. При достижении критического значения одним из опасных факторов пожара происходит блокирование эвакуационного выхода. Под блокированием эвакуационных выходов понимается интервал времени, когда опасные факторы пожара создадут преграду у эвакуационных выходов и люди не смогут покинуть здание. Критическое время каждого опасного фактора пожара определяют, как время достижения этим фактором предельно допустимого значения на путях эвакуации на высоте 1,7 м от пола [17]. Данная высота была взята из расчета на то, что средний рост человека составляет

170 сантиметров.

Критические показатели для каждого опасного фактора пожара приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Критические показатели опасных факторов пожара\*

Опасный фактор	Предельный параметр	Размерность.
1	2	3
Тепловой поток	1400	Вт/м <sup>2</sup>
Температура	70	°
Предельная видимость в дыму	20	м
HCL	23·10 <sup>-6</sup>	кг/м <sup>3</sup>
O <sub>2</sub>	0,226	кг/м <sup>3</sup>
CO	1,16·10 <sup>-3</sup>	кг/м <sup>3</sup>
CO <sub>2</sub>	0,11	кг/м <sup>3</sup>

Так же, программное обеспечение позволяет получить карту температур и видимости по всей площади помещения. Используя шкалу, можно определить температуру и уровень видимости в каждой точке области в каждый момент времени (рис. 4, 5).

По карте температуры на рисунке 4 можно уви-

деть, что источник пожара не мешает на пути эвакуации и тем самым не блокирует пожарные выходы.

Однако вместе с тем по карте видимости (рис. 5) можно увидеть, что задымление мешает на пути эвакуации и тем самым затрудняет выход из помещения, что в последствии может привести к человеческим потерям.

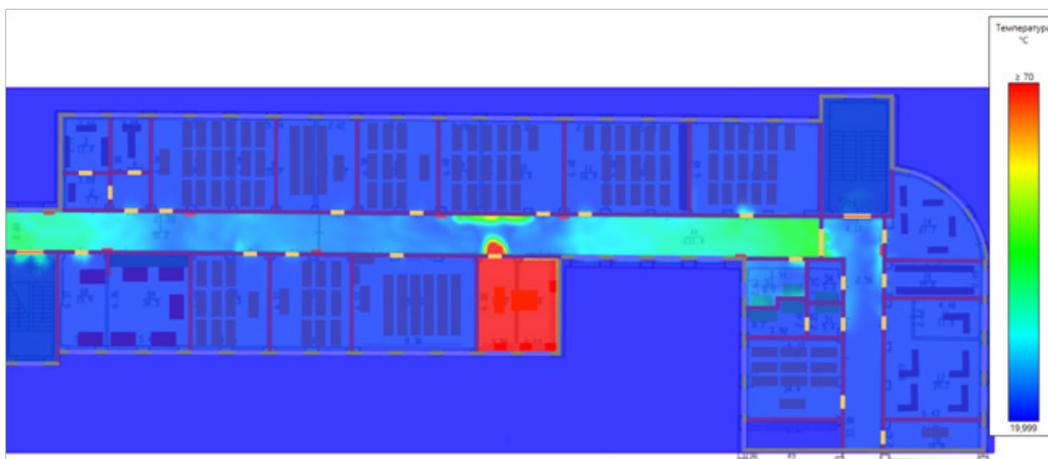


Рисунок 4 – Температурная карта сценария №1

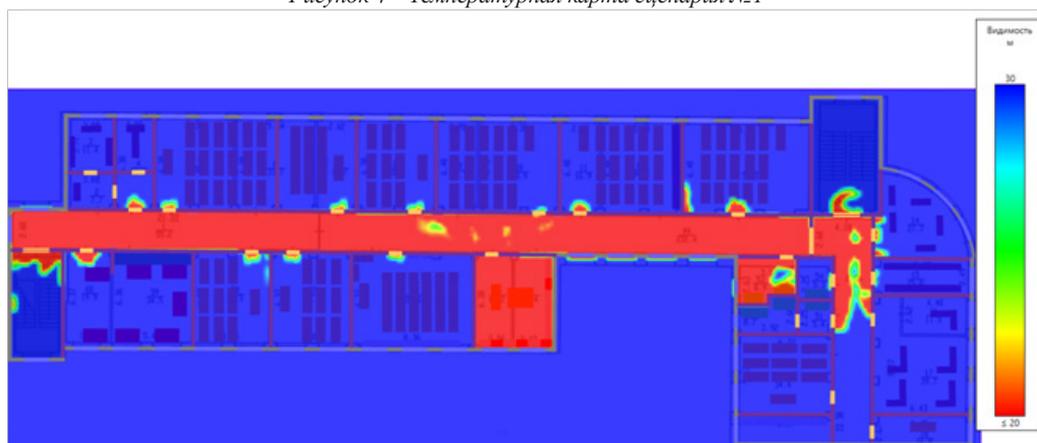


Рисунок 5 – Карта видимости сценария №1

Следующим шагом алгоритма – моделирование эвакуации. Действия, которые совершает человек, приводят к ситуациям, когда шансы на успешную эвакуацию резко уменьшаются. Паника – одна из крайне опасных ситуаций для человека и окружающих его людей, поскольку паника распространяется не хуже пожара. Паникующие начинают себя вести крайне неадекватно, часто опасно для окружающих, и попутно нагнетают обстановку вокруг. Из-за этого появляется опасность возникновения давки, убийств

по неосторожности, несчастных случаев.

В результате моделирования мы получили данные по общему времени эвакуации, времени начала эвакуации, количеству эвакуировавшихся, схеме эвакуации и данные по наиболее используемым путях эвакуации. Данные по эвакуации приведены в таблице 2.

На основании проведенных моделирований получаем значение индивидуального пожарного риска (табл. 3).

Таблица 2 – Результаты эвакуации сценария №1

Сценарий	Время начала эвакуации, с	Время эвакуации, с	Время существования скоплений, с	Общее кол-во людей	Кол-во эвакуировавшихся людей
Сценарий 1	0,0	41,4	0,2	80	80

Таблица 3 – Расчет индивидуального риска

Сценарий	Частота возникновения пожара	Коэффициент соответствия АУП	Вероятность присутствия людей	Вероятность эвакуации людей	Коэффициент соответствия системы противопожарной защиты	Индивидуальный риск
Сценарий 1	$4 \cdot 10^{-2}$	0	0,5	$9,99 \cdot 10^{-1}$	0,640	$7,2 \cdot 10^{-6}$

Согласно приказу МЧС № 382, индивидуальный пожарный риск отвечает требуемому, если в (1) [16]:

$$Q_g \leq Q_g^H, \quad (1)$$

где  $Q_g^H$  – Нормативное значение индивидуального пожарного риска  $Q_g^H=10^{-6}$  в год;

$Q_g$  – Расчетная величина индивидуального пожарного риска.

**Выводы.** Данное исследование показало, что у выбранного сценария индивидуальный риск превышает нормативное значение, а, следовательно, необходимо рассмотреть мероприятия по повышению пожарной безопасности в здании.

Основываясь на показателях опасных факторов пожара и результатах эвакуации людей, для повышения пожарной безопасности предлагается установка противодымной вентиляционной системы. Противодымная вентиляционная система предназначена для быстрого и эффективного удаления дыма из сооружения [18]. Кроме того, противодымная вентиляция и дымоудаление, способствует защите людей от последствий задымленности на путях эвакуации во время развития или тушения пожара.

Основные назначения этой системы:

- предотвращает распространение дыма от источника пожара;
- создает условия для эвакуации людей в случае задымления помещений;
- обеспечивает микроклимат для работы МЧС и людей, занятых в борьбе с возгоранием;
- обеспечивает защиту жизни людей и сохранность имущества от возможных повреждений в случае пожара.

Также, согласно технике безопасности, при эвакуации необходимо отключить все электроприборы. Однако паника во время пожара создает вероятность того, что человек не обесточит электроэнергию, а это дополнительный источник возгорания. Для решения данной проблемы предлагается применение пожарной автоматики защитного отключения электроустановок. Пожарная автоматика обеспечивает автоматическое отключение электропитания в случае появления признаков пожара или аварии [19].

За счёт отключения в зависимости от ситуации, автоматика исключает образование источника зажигания, ограничивает распространение пожара, защищает людей от поражения электрическим током, а также предотвращает повторное возгорание от электрического источника. Применение автоматики в помещениях с большим количеством электрооборудования, позволит не тратить время на их отключения, а сконцентрироваться на эвакуации из здания.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Mhamoud H. A. M., & Yanmin, J. Effect of different additives on high temperatures of concrete // Journal of Structural Fire Engineering. – 2018. – 9(2). – P. 161-170.
2. Mhamoud H. A. M., & Yanmin, J. The ability of high performance concrete to resist high temperature // Journal of Structural Fire Engineering. – 2017. – 8(4). – P. 392-401.

3. Rybakov V., Zhuvak, O., Hoffmann, A., Sergeeva, F., & Verigo, P. The influence of reinforcing joints on the fire resistance of reinforced concrete structures // Magazine of Civil Engineering. – 2020. – 100(8).
4. Gravit M. V., Nedryshkin, O. V., & Ogidan, O. T. Transformable fire barriers in buildings and structures // Magazine of Civil Engineering. – 2018. – 77(1). – P. 38-46.
5. Gravit M. V., Golub, E. V., & Antonov, S. P. Fire protective dry plaster composition for structures in hydrocarbon fire // Magazine of Civil Engineering. – 2018. – 79(3). – P. 86-94.
6. Levashov N., Akulov, M., & Sokolova Y. Modifying composition of plastering mortar for the purpose of enhancing fire resistance of building structures by means of silicate additives // Paper presented at the E3S Web of Conferences. – 2019. – P. 97.
7. Eremina, T., & Korolchenko, D. Fire protection of building constructions with the use of fire-retardant intumescent compositions // Buildings.2020. – 10(10). – P. 1-14.
8. Avdeeva M., Byzov A., Smyshlyayeva K., & Leonova N. Assessment of the fire situation of a certain building using fenix+ // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2021. – 1259 AISC. –P. 391–400.
9. Avdeeva M., Uzun O., Borodkina Y. Simulation of the evacuation process at various economic facilities using the Anylogic software product // 13th international scientific and practical conference on state and prospects for the development of agribusiness, interagromash 2020, – T. 175.
10. Бочка А.А. Актуальность применения средств контроля и мониторинга пожарных рисков / Научные исследования в современном мире: опыт, проблемы и перспективы развития сборник научных статей по материалам III международной научно-практической конференции. – 2020. – С. 63–67.
11. Dubov, S., Babikov, I., Vasilyev, M., & Tanklevsky, L. Methods of instrument testing of smoke detectors performance // Paper presented at the MATEC Web of Conferences, 2018. – 245.
12. McKinney, J., & Ali, F. Artificial neural networks for the spalling classification & failure prediction times of high strength concrete columns // Journal of Structural Fire Engineering. – 2014. – 5(3). – P. 203-214.
13. Daryan, A. S., & Yahyai, M. Predicting the behavior of welded angle connections in fire using artificial neural network // Journal of Structural Fire Engineering. – 2018. – 9(1). – P. 28-52.
14. Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2020 году» / Электронный ресурс. URL: <https://www.mchs.gov.ru/dokumenty/5304> (Дата обращения 02.10.2021).
15. Fenix+/Fenix+ 2 Program for determination of size of individual fire risk, version x.1.74 Methodical management / Руководство пользователя. 2018. 363 с. / Электронный ресурс. URL: <https://www.mst.ru> (Дата обращения 02.10.2021).
16. Приказ МЧС РФ от 30 июня 2009 г. N 382 "Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности" / Электронный ресурс. URL: <http://ivo.garant.ru/#/document/12169057/paragraph/1/doclist/57729/> (Дата обращения 20.03.2021).
17. Степанов В.П. Теоретические основы распространения опасных факторов пожара // Молодой ученый. – 2021. – № 40 (382). – С. 217-222.
18. Противодымная вентиляция и дымоудаление: назначение и особенности / Электронный ресурс. URL: <http://ventilationpro.ru/vytyazhnaya-ventilyatsiya/protivodymnaya-ventilyatsiya-i-dymoudalenie-naznachenie-i-osobennosti.html> (Дата обращения 20.11.2021).
19. Мельников В. С. Пожарная автоматика защитного отключения электроустановок / Электронный ресурс. URL: <http://izd-mn.com/PDF/08MNNPM19.pdf> (Дата обращения 20.11.2021).

Статья поступила в редакцию 30.05.2022

Статья принята к публикации 16.09.2022

УДК 331.451

DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0027

**ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ЗДОРОВЬЕ РАБОТНИКОВ ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ  
В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ ТРУДОВОГО ПРОЦЕССА**

© Автор(ы) 2022

SPIN:2938-2964

AuthorID:1150512

ORCID: 0000-0002-8444-7672

**АНТОНОВА Анна Петровна**, аспирант, ассистент кафедры «Управление безопасностью в техносфере»

*Российский университет транспорта*

(127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9, e-mail: an.ant.97@mail.ru)

SPIN: 3944-9550

AuthorID:1112237

ORCID: 0000-0002-9646-017X

**КАШЕВСКАЯ Анна Михайловна**, аспирант кафедры «Управление безопасностью в техносфере»,

ассистент кафедры «Русский и иностранный языки»

*Российский университет транспорта*

(127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9, e-mail: anna.kasevskaya@gmail.com)

SPIN: 2874-8742

AuthorID: 989099

ORCID: 0000-0002-9666-2265

ScopusID: 6508058913

**НАРУСОВА Елена Юрьевна**, кандидат технических наук,

доцент кафедры «Управление безопасностью в техносфере»

*Российский университет транспорта*

(127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9, e-mail: e.narusova@ubt-rut-miit.ru)

SPIN: 2200-4594

AuthorID: 716274

ORCID: 0000-0002-1563-3850

ScopusID: 5722004297

**СТРУЧАЛИН Владимир Гайзович**, кандидат технических наук,

доцент кафедры «Управление безопасностью в техносфере»

*Российский университет транспорта*

(127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9, e-mail: v.struchalin@ubt-rut-miit.ru)

**Аннотация.** В статье рассматривается влияние факторов трудовой деятельности на профессиональное здоровье преподавателей. При изучении трудовой деятельности преподавателей вузов основное внимание уделяется оценке их умственных нагрузок в процессе научной и учебно-методической работы и взаимодействия со студентами. Рассматривается изменение трудовой деятельности и ее влияние на здоровье преподавателей. Одним из значимых факторов, влияющих на работоспособность и эффективность преподавателей, является объем и особенности должностной нагрузки. Обязанность работодателя - обеспечение комфортных условий труда, которые являются гарантией высокой эффективности и качества работы сотрудника. В связи с этим контроль и регулирование выполнения не только учебной, но и учебно-методической, организационной и воспитательной функций преподавателя является необходимым условием получения желаемых результатов его деятельности, поскольку сама профессия предполагает повышенные психоэмоциональные нагрузки. Все факторы трудовой деятельности преподавателя должны учитываться при специальной оценке условий труда работников образовательных учреждений.

**Ключевые слова:** охрана труда; психоэмоциональное состояние; трудовая деятельность преподавателей; специальная оценка условий труда.

**PROFESSIONAL HEALTH OF HIGHER SCHOOL EMPLOYEES IN MODERN CONDITIONS  
OF THE LABOR PROCESS**

© The Author(s) 2022

**ANTONOVA Anna Petrovna**, post-graduate student “Management of safety in a technosphere”

**KASHEVSKAYA Anna Mikhailovna**, post-graduate student “Management of safety in a technosphere”

**NARUSOVA Elena Yurievna**, candidate of technical sciences, associate professor

**STRUCHALIN Vladimir Gaiozovich**, candidate of technical sciences, associate professor

## Department "Management of safety in a technosphere"

Russian University of Transport

(127994, Russia, Moscow, Obraztsov St. 9, building 9, e-mails: a.antonova@ubt-rut-miit.ru, anna.kasevskaya@gmail.com, e.narusova@ubt-rut-miit.ru, v.struchalin@ubt-rut-miit.ru)

**Abstract.** The article examines the influence of factors of labor activity on the professional health of teachers. When studying the work of university teachers, the main attention is paid to assessing their mental loads in the process of scientific and educational work and interaction with students. The article considers the change in work activity and its impact on the health of teachers. One of the significant factors affecting the efficiency and effectiveness of teachers is the volume and features of the job load. The employer's duty is to ensure comfortable working conditions, which are a guarantee of high efficiency and quality of the employee's work. In this regard, the control and regulation of the performance of not only educational, but also educational, organizational and educational functions of a teacher is a necessary condition for obtaining the desired results of his activities, since the profession itself involves increased psycho-emotional loads. All factors of a teacher's work activity should be taken into account in a special assessment of the working conditions of employees of educational institutions.

**Keywords:** occupational safety and health; psycho-emotional state; labor activity of teachers; special assessment of working conditions.

*Для цитирования:* Антонова А.П. Профессиональное здоровье работников высшей школы в современных условиях трудового процесса / А.П. Антонова, А.М. Кашевская, Е.Ю. Нарусова, В.Г. Стручалин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022. – Т. 11. – № 3(59). – С. 176-181. – DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0027.

**Введение.** Профессиональная деятельность накладывает на человека целый ряд обязательств, связанных с особой подготовкой, необходимой для выполнения работы, и является очень значимой частью его жизни, влияющей на состояние физического и психического здоровья. Профессия педагога относится к наиболее сложным, так как она предполагает, наряду с выполнением квалификационных требований по умению преподавать соответствующую дисциплину, наличие способности эффективного взаимодействия с людьми, для которых необходимо быть образцом социальной и моральной ответственности, нравственности. Для реализации рабочих задач нужно обладать обширными знаниями в различных областях и целым рядом практических навыков [1].

Согласно ст. 50 п.3 Федерального закона от 29.12.2012 N 273-ФЗ (ред. от 16.04.2022) «Об образовании в Российской Федерации», а также ст. 4 п. 7 абз.1 Федерального закона от 23.08.1996 №127 «О науке и государственной научно-технической политике» преподаватели высшей школы реализуют множество задач [2, 3]. Главными из них являются научная, научно-техническая деятельность и (или) экспериментальные разработки; также они не должны нарушать права и свободы человека, не могут причинять вред его жизни и здоровью и оказывать пагубное влияние на окружающую среду.

Помимо основных задач преподаватели осуществляют различные общепедагогические функции. К ним относятся:

- конструктивная – построение педагогического процесса и отбор материала;
- организаторская – структурирование всех компонентов образовательного процесса и необходимой информации;
- коммуникативная – процесс постоянного общения между всеми участниками процесса обучения;

– гностическая – изучение современных методов и технологий, получение новейших актуальных знаний, постоянное самосовершенствование при подготовке к лекциям и практическим занятиям.

Если рассматривать преподавателя как субъекта педагогической деятельности, то необходимо отметить реализацию тактической, оперативной и стратегической функций в качестве его профессиональных задач. Отдельно можно выделить мобилизующую, информационную, ориентационную и развивающую функции [4]. Такое разнообразие говорит о многозадачности людей, занятых в данной сфере деятельности, и высокой вероятности негативного влияния на них повышенных нагрузок.

Эмоционально насыщенные межличностные контакты, общение с широким кругом людей, ведение лекционных и семинарских занятий, выступления на конференциях и прочих мероприятиях вызывают напряжение и стресс, что оказывает неблагоприятное влияние на состояние психики. Помимо этого, усиленная умственная нагрузка при подготовке к занятиям и ведению научно – исследовательской и учебно-методической деятельности сказывается также на физическом здоровье (горловые болезни, мигрени, слабое зрение, гиподинамия и др.). В совокупности следствием переутомления может стать не только профессиональное выгорание, но и серьезные проблемы со здоровьем [5].

Необходимо учитывать, что любое изменение стандартов, правил, форм отчетности требует от педагогов переработки различных имеющихся или разработанных новых документов, вследствие чего увеличивается умственное и психоэмоциональное напряжение. Причиной является дополнительная нагрузка, включающая в себя работу с различными информационными материалами, документами, формами отчетности, то есть помимо основной деятельности (подготовка к

занятиям, взаимодействие с учащимися и т. д.) в обязанности преподавателя входит достаточно внушительный перечень задач [6].

Сочетание в последние годы, в частности, из-за ситуации с распространением новой коронавирусной инфекции COVID-19, очного и дистанционного форматов обучения, имеющих специфику и требующих отдельной подготовки к занятиям, сделало разработку электронных пособий, подготовку портфолио, компьютерных презентаций, онлайн курсов и т. д. не только желательными, но необходимыми видами деятельности преподавателя. Кроме того, цифровая трансформация вузов связана, в свою очередь, с изменениями учебной нагрузки. В результате система трудовых задач расширяется из-за растущего числа новых дополнительных обязанностей [7].

Материальные средства труда, под которыми подразумеваются аудитории и их оснащение, методические материалы, учебные пособия, а в технических вузах это также используемые в учебном процессе современные приборы, аппараты и лабораторные комплексы, аналогичные действующим в профессиональной сфере, также оказывают существенное влияние на преподавателей [8]. Как перегруженность аудиторий информационными и техническими средствами, так и недостаток каких-либо вспомогательных средств обучения негативно сказывается на здоровье сотрудников, осуществляющих профессиональную деятельность в соответствии с современными требованиями. Следовательно, при организации рабочего места необходим контроль работодателя для достижения баланса и соблюдения принципа разумной достаточности, создания комфортных и максимально безопасных условий труда сотрудников.

Среди основных функциональных средств труда необходимо выделить внешние и внутренние. К внешним относятся поведение, мимика, жесты и речь, а внутренними являются профессионально важные качества, отвечающие за реализацию педагогической компетентности и профессионально-педагогического мастерства. Данные качества напрямую зависят от психоэмоционального состояния преподавателей и оказывают непосредственное влияние на их здоровье и эффективность выполняемых профессиональных задач [9].

Учитывая значимость перечисленных выше вопросов, возникает необходимость в их соответствующей оценке со стороны трудового законодательства.

**Методология.** Целью данной статьи является выявление и анализ негативных факторов, влияющих на психоэмоциональное состояние и профессиональное здоровье преподавателей вузов, и разработка мер по уменьшению их воздействия.

Для выявления негативных факторов и исследования их влияния на профессиональное здоровье преподавателей проводилось анкетирование.

**Результаты.** На основе анкетирования преподавателей было установлено, что практически все опрошенные работники связывают негативные изменения

своего самочувствия и функционального состояния с влиянием профессиональных нагрузок. Так, 97% участников опроса указали, что изменения в трудовой деятельности влияют на их физическое состояние, и 100% опрошенных – на общее психоэмоциональное состояние.

Результаты анкетирования показывают, что преподаватели отмечают ухудшение своего физического и эмоционального состояния и связывают его с изменениями трудовой нагрузки, повышающей напряженность трудового процесса, что негативно сказывается на здоровье, снижая эффективность их работы за счет уменьшения скорости психологических реакций и интенсивности протекания мыслительных процессов.

Преподавателями были отмечены следующие состояния, которые, по их мнению, связаны с изменяющейся нагрузкой: напряжение – 89%, утомляемость – 93%, сонливость – 71%, снижение скорости психологических реакций и интенсивности протекания мыслительных процессов, снижение внимательности – 75%, притупление памяти – 52% (рис. 1).

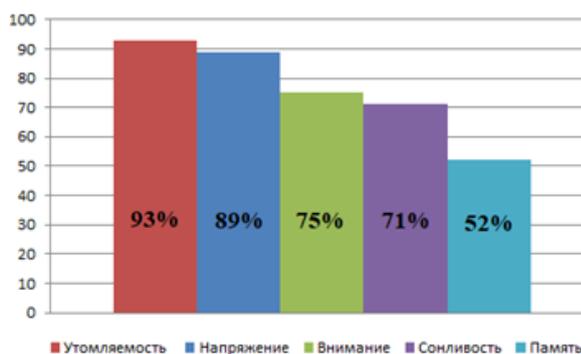


Рисунок 1 – Состояния преподавателей, связанные с увеличением нагрузки

**Обсуждение.** По результатам СОУТ, регламентированной Федеральным законом «О специальной оценке условий труда» от 28.12.2013 N 426-ФЗ, условия труда преподавателей по напряженности трудового процесса, в основном, относятся к 1 и 2 классам, что соответствует гигиеническим нормативам [10, 11, 12].

В приложении 21 приказа Министерства труда и социальной защиты РФ №33н от 24 января 2014г. «Об утверждении Методики проведения специальной оценки условий труда, Классификатора вредных и (или) опасных производственных факторов, формы отчета о проведении специальной оценки условий труда и инструкции по ее заполнению» при определении напряженности трудового процесса учитываются такие параметры как сенсорные нагрузки и монотонность нагрузок [13].

Однако эти параметры являются только частью факторов, влияющих на преподавателя.

До 2014 года в Российской Федерации действовал приказ Минздравсоцразвития России от 26.04.2011 N 342н «Об утверждении Порядка проведения аттестации рабочих мест по условиям труда», по которому проводилась оценка рабочих мест. Сравнение Приложения 21 методики проведения СОУТ и таблицы 18

руководства, действующего при аттестации рабочих мест (АРМ) – «Р 2.2.2006-05. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда (утв. Главным государственным санитарным врачом

РФ 29.07.2005)», показывает, что ранее при оценке рабочих мест учитывались, наряду с сенсорными нагрузками и монотонностью нагрузок, интеллектуальные и эмоциональные нагрузки, а также режим работы (табл. 1).

Таблица 1 – Сравнение учитываемых параметров напряженности трудового процесса

Приказ Минтруда РФ №33н от 24.01.2014г. «Об утверждении Методики проведения специальной оценки условий труда, Классификатора вредных и (или) опасных производственных факторов, формы отчета о проведении специальной оценки условий труда и инструкции по ее заполнению»		Р 2.2.2006-05. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда	
сенсорные нагрузки	плотность сигналов (световых и звуковых) и сообщений; число производственных объектов одновременного наблюдения; работа с оптическими приборами; нагрузка на голосовой аппарат	сенсорные нагрузки	плотность сигналов (световых, звуковых) и сообщений; число производственных объектов одновременного наблюдения; работа с оптическими приборами; нагрузка на голосовой аппарат; нагрузка на слуховой анализатор; длительность сосредоточенного наблюдения; размер объекта различения (при расстоянии от глаз работающего до объекта различения не более 0,5 м); наблюдение за экранами видеотерминалов
монотонность нагрузок	число элементов (приемов), необходимых для реализации простого задания или многократно повторяющихся операций; монотонность производственной обстановки (время пассивного наблюдения за ходом технологического процесса)	монотонность нагрузок	число элементов (приемов), необходимых для реализации простого задания или многократно повторяющихся операций; монотонность производственной обстановки (время пассивного наблюдения за ходом технологического процесса); продолжительность выполнения простых заданий или повторяющихся операций; время активных действий, в остальное время - наблюдение за ходом производственного процесса
		интеллектуальные нагрузки	содержание работы; восприятие сигналов (информации) и их оценка; распределение функций по степени сложности задания; характер выполняемой работы
		эмоциональные нагрузки	степень ответственности за результат собственной деятельности, значимость ошибки; степень риска для собственной жизни; степень ответственности за безопасность других лиц; количество конфликтных ситуаций, обусловленных профессиональной деятельностью, за смену
		режим работы	фактическая продолжительность рабочего дня; наличие регламентированных перерывов и их продолжительность

Сравнительная таблица наглядно демонстрирует, что при проведении аттестации рабочего места ранее учитывалось большее количество факторов, влияющих на психофизиологическое состояние преподавателя [14]. Нельзя сказать, что в настоящее время нагрузка преподавателя снизилась или его трудовая деятельность стала менее напряженной и ответственной. Что касается режима работы, то при широко распространенной в период удаленной работы и ставшей в настоящее время общепринятой практике общения со студентами и их консультаций посредством электронных средств коммуникации, а не только лично в часы пребывания преподавателя в университете, фактическую продолжительность рабочего дня довольно сложно определить. Конечно, в каждом конкретном случае существуют различия, определя-

емые индивидуальными качествами педагога и традициями учебного заведения, однако большая часть опрошенных преподавателей указали, что отвечают на сообщения студентов независимо от того, в рабочее или нерабочее время оно поступило.

Результаты анкетирования показывают, что проблемы, связанные с изменением трудовой деятельности и влияющие на физическое и общее психоэмоциональное состояние преподавателей, остаются актуальными и требуют более глубокого анализа вызывающих их факторов [15].

Нагрузка педагогов высшей школы связана не только с осуществлением преподавательской деятельности, они также реализуют научную, публикационную, методическую, воспитательную и иные функции. Это говорит о том, что сенсорные и монотонные нагрузки

являются далеко не единственными факторами, которые стоит учитывать при мониторинге рабочего места в образовательных структурах. Количество проводимых занятий прямо влияет на физическое здоровье, а научная и публикационная активность являются интеллектуальной нагрузкой.

В процессе воспитания затрагивается и эмоциональная сфера, так как происходит непосредственное взаимодействие преподавателей с молодыми людьми, переживающими определенный кризис, связанный с адаптацией, вопросами профориентации и становления личности [16, 17]. Такое взаимодействие с обучающимися предполагает постоянную вовлеченность и искреннюю заинтересованность преподавателя в решении их проблем. Кроме того, широкий круг интересующих студентов актуальных политических, экономических, социальных вопросов ставит перед педагогами задачу постоянного ознакомления, анализа и готовности к квалифицированному и взвешенному обсуждению сложных проблем из различных сфер жизни общества.

Для того чтобы воспитательный процесс был успешным и студентам своевременно оказывалась необходимая помощь и поддержка, сотрудники вузов должны чувствовать себя комфортно на рабочем месте и не страдать от перегрузок, недостатка времени, сверхзадач и различных стрессов. В итоге, неполный учет параметров напряженности трудового процесса преподавателей может непосредственно сказаться на студентах, поскольку любое общение – двусторонний процесс. Педагог является более зрелым участником данного взаимодействия, при эмоциональном выгорании или психологическом кризисе весьма вероятно произвольное негативное воздействие на студентов [18].

При неправильной организации труда и недостаточном отдыхе напряжение ведет к неэкономному расходованию энергии и к уменьшению резервных сил организма, что проявляется в утомляемости, стрессах, межличностных конфликтах, как следствие, к ухудшению работы анализаторов, торможению условно-рефлекторных реакций организма, снижению интенсивности протекания мыслительных процессов [19].

Наиболее значимыми стрессорами, связанными с деятельностью преподавателей, можно считать: чрезмерную интенсивность работы, критику выполняемой работы, межличностные конфликты, повышенное напряжение, отсутствие эмоционального тонуса. Последствия таких состояний могут проявляться в различных формах дезадаптации, вплоть до психоэмоционального срыва и неблагоприятно сказываться на трудовой деятельности [20, 21].

Вследствие высокого психоэмоционального напряжения происходит активация физиологических систем организма. Поскольку нервная система человека высокоразвита, эмоциональные стрессоры могут привести к развитию психосоматических заболеваний, которые можно было бы отнести к профессиональным заболеваниям. Широко распространенными

среди преподавателей являются: нейроциркуляторные расстройства, сердечно-сосудистые заболевания, заболевания желудочно-кишечного тракта, а также эндокринные заболевания.

**Выводы.** Проведенный в процессе исследования опрос показал, что преподаватели вуза отмечают наличие таких состояний как утомляемость, сонливость, снижение внимательности, притупление памяти, физическое и психоэмоциональное напряжение и связывают их возникновение с негативными факторами трудового процесса: повышенными сенсорными, монотонными, интеллектуальными и эмоциональными нагрузками, нарушениями режима работы.

Для уменьшения степени воздействия негативных факторов необходимо проведение целенаправленной работы в следующих направлениях.

1. Улучшение обучения сотрудников с использованием эффективных современных методик для приобретения компетенций, существенно облегчающих профессиональную деятельность и позволяющих сократить время решения конкретных задач. Проведение мероприятий, в процессе которых отмечаются достижения сотрудников, обсуждаются успехи и позитивные планы коллектива, что будет благотворно влиять на психоэмоциональное состояние работников.

2. Устранение из повседневного общения руководства и преподавательского состава излишней непродуктивной критики и различных пессимистических прогнозов об ожидающихся возможных проверках, а также об усложнении или повышении разнообразной нагрузки, создающих впечатление бесполезности усилий и невозможности выполнения всех требований, будет способствовать созданию нормального рабочего настроения в коллективе.

3. Снижение объема нагрузки преподавателя за счет уменьшения второстепенных, необязательных задач; пересмотр и отмена дублирующих документов, отчетов и т.п.

4. Стимулирование, в том числе материальное, здорового образа жизни, занятий физической культурой и спортом, профилактики заболеваний и своевременного лечения работников.

Все эти действия будут эффективными только в сочетании с реальным контролем соблюдения режима труда и отдыха и улучшением условий труда, что позволит уменьшить степень негативного влияния различных факторов на выполнение профессиональных задач.

Целесообразно дополнительно изучить вопрос включения в число учитываемых параметров напряженности трудового процесса при проведении СОУТ реально действующих на преподавателя факторов, что обеспечит получение результатов, отражающих действительную ситуацию.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Пашин, Н. П. Решение проблем оценки и регулирования напряженности на рынке труда: практика и современные подходы / Н.П. Пашин, И.А. Волошина, В.В. Харькин // Социально-трудовые исследования. – 2021. – № 1(42). –

- C. 8-23. – DOI 10.34022/2658-3712-2021-42-1-8-23. – EDN SNATDS.
2. Федеральный закон «Об образовании в Российской Федерации» от 29.12.2012 N 273-ФЗ (с изменениями на 24 марта 2021 года).
3. Федеральный закон «О науке и государственной научно-технической политике» от 23.08.1996 №127.
4. Дорوفеев, А. А. Трансформация функций преподавателя высшей школы в результате частичной цифровизации учебного процесса / А. А. Дорوفеев, С. А. Дряблов, С. С. Жигулин // Актуальные проблемы преподавания математических и естественно-научных дисциплин в образовательных организациях высшего образования: Сборник докладов очно-заочной научно-методической конференции, Кострома, 13–15 февраля 2021 года. – Кострома: Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военная академия радиационной, химической и биологической защиты имени Маршала Советского Союза С.К. Тимошенко» (г. Кострома) Министерства обороны Российской Федерации, 2021. – С. 187-193. – EDN BQWHTA.
5. Козловская, Ю. В. Анализ воздействия вредных факторов на профессиональную деятельность преподавателей вузов / Ю. В. Козловская // Экопрофилактика, оздоровительные и спортивно-тренировочные технологии: Материалы II Международной научно-практической конференции, посвященной 85-летию Балашовского института (филиала) ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», Балашов, 20–21 февраля 2018 года / Под общей редакцией Д.В. Воробьева, Н.В. Тимушкиной. – Балашов: Издательство «Саратовский источник», 2018. – С. 155-161. – EDN YAWBUL.
6. Лепихина, Т.Л. Влияние качества трудовой жизни на здоровье работников сферы высшего образования / Т.Л. Лепихина, М.А. Лесникова // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. – 2017. – Т. 13. – № 5(350). – С. 935-948. – DOI 10.24891/ni.13.5.935. – EDN YOYRPGV.
7. Башмакова, Е.И. Трансформирование функций преподавателя высшей школы в период пандемии / Е.И. Башмакова // IV Моисеевские чтения: Доклады и материалы Общероссийской (национальной) научной конференции, Москва, 15–16 апреля 2021 года. – Москва: Московский гуманитарный университет, 2021. – С. 173-179. – EDN MOFFLB.
8. Подготовка специалистов в области «техносферной безопасности» в высшей школе / О.С. Виноградова, Н.А. Виноградова, Н.А. Кадакина, И.О. Малокова // Актуальные проблемы физики и технологии в образовании, науке и производстве: Материалах Всероссийской научно-практической конференции, Рязань, 28–29 марта 2019 года. – Рязань: Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина, 2019. – С. 176-179. – EDN OPNNZD.
9. Салмин, О. Н. Дидактические средства обучения: функции, типология, особенности использования / О. Н. Салмин, Е. И. Карпухина, Д. И. Карпухина // Поволжский педагогический поиск. – 2021. – № 4(38). – С. 95-102. – DOI 10.33065/2307-1052-2021-4-38-95-102. – EDN CURBZO.
10. Федеральный закон «О специальной оценке условий труда» от 28.12.2013 N 426-ФЗ (с изменениями на 30 декабря 2020 года).
11. Стасева, Е.В. Определение профессионального риска на основе специальной оценки условий труда / Е.В. Стасева, С.В. Филатова // Молодой исследователь Дона. – 2018. – № 2(11). – С. 81-85. – EDN XOFXPRV.
12. Филонова, Е.Н. Оценка условий учебы и труда в высших учебных заведениях / Е.Н. Филонова // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность - 2018: сборник статей по материалам международной научно-практической конференции, Севастополь, 24–27 сентября 2018 года / под ред. Л.И. Лукиной, Н.А. Бежина, Н.В. Ляминой. – Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет», 2018. – С. 1221-1223. – EDN YYVJML.
13. Сайт Международной организации труда. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа [https:// websot.jimdo.com](https://websot.jimdo.com).
14. Двойникова, Д.В. Специальная оценка условий труда вместо аттестации рабочих мест / Д.В. Двойникова, А.В. Лексина, В.Я. Бершадский // Молодежь и наука. – 2018. – № 8. – С. 71. – EDN YWBFNZ.
15. Петракова, А.В. Стили педагогического общения и профессиональное выгорание педагогов / А.В. Петракова // Социокультурные проблемы современного человека, Новосибирск, 17–18 мая 2018 года. – Новосибирск: Новосибирский государственный педагогический университет, 2018. – С. 116-123. – EDN XUIVWN. Малаян К.Р. Тернистый путь развития охраны труда: ее актуальные проблемы / Малаян К.Р // Безопасность жизнедеятельности. 2016. № 3 (183). – С. 3 – 14.
16. Педагогическое сопровождение процесса адаптации студентов первого курса к обучению в вузе / Е.Ю. Нарусова, А.М. Королева, Н.Б. Фомина, В.Г. Стручалин // Вестник НЦБЖД. – 2022. – № 2(52). – С. 48-57. – EDN ZMYZVL.
17. Конфликт в студенческой среде и его преодоление как этап формирования личности / Д.А. Жикина, П.А. Сорокин, Е.Ю. Нарусова, Н.Б. Фомина // Актуальные проблемы науки и образования в условиях современных вызовов : СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ IX МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ (шифр -МКАП 9), Москва, 21 марта 2022 года. – Москва: «ООО «ИРОК»; ИП Овчинников Михаил Артурович (Типография Алеф), 2022. – С. 47-51. – EDN QTVRPE.
18. Кашевская, А.М. Формирование психологически комфортной среды для успешного обучения студентов вуза / А.М. Кашевская, А.Ю. Ведерникова, Е.Ю. Нарусова // Образование в России и актуальные вопросы современной науки: Сборник статей V Всероссийской научно-практической конференции, Пенза, 16–17 мая 2022 года / Под научной редакцией П.А. Гагаева, Е.П. Белозерцева. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2022. – С. 188-193. – EDN QTANYW.
19. Баймаков, Е.А. Научное обоснование комплекса профилактических мер сохранения здоровья преподавателей образовательных организаций высшего и среднего медицинского образования с учетом особенностей профессиональных и поведенческих факторов риска / Е. А. Баймаков // Профилактическая медицина – 2019 : сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 14–15 ноября 2019 года. – Санкт-Петербург: Северо-Западный государственный медицинский университет имени И.И. Мечникова, 2019. – С. 43-50. – EDN AHVVRAT.
20. Багян, А.Г. Влияние психоэмоционального состояния работника на безопасность труда / А.Г. Багян, Е.В. Стасева // Молодой исследователь Дона. – 2019. – № 3(18). – С. 7-9. – EDN UKFDJR.
21. Смелъцова, А.С. «Личностная зрелость руководителя»: разработка и первичная психометрическая проверка опросника / А.С. Смелъцова, М.А. Щукина // Вестник Вятского государственного университета. – 2018. – № 2. – С. 102-112. – DOI 10.25730/VSU.7606.18.014. – EDN XPTYCT.

*Статья поступила в редакцию 08.08.2022*

*Статья принята к публикации 16.09.2022*

УДК 54.061, 543.51

DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0028

## МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ ИСТОЧНИКОВ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ПО СОДЕРЖАНИЮ ПРИМЕСЕЙ МЕТАЛЛОВ В НЕФТИ

© Автор(ы) 2022

SPIN: 4181-4737

AuthorID: 432595

ORCID: 0000-0002-1545-7607

**СЕМЕНОВ Владимир Всеволодович**, доктор технических наук,  
профессор кафедры инженерной защиты окружающей среды

*Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)  
(190013, Россия, Санкт-Петербург, Московский проспект, 24-26/49, e-mail: semenovv50@yandex.ru)*

SPIN: 2144-4276

AuthorID: 708424

ORCID: 0000-0003-4651-8211

ResearcherID: L-1764-2013

ScopusID: 57442237000

**ИВАХНЮК Сергей Григорьевич**, кандидат технических наук, заместитель начальника НИИ  
*Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России*

*(196105, Россия, Санкт-Петербург, Московский проспект, 149, e-mail: sgi78@mail.ru)*

SPIN: 3913-7751

AuthorID: 586844

ORCID: 0000-0002-2407-5061

ScopusID: 57217937956

**МОТОРЫГИН Юрий Дмитриевич**, доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры криминалистики и инженерно-технических экспертиз

*Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России  
(196105, Россия, Санкт-Петербург, Московский проспект, 149, e-mail: fire-risk@mail.ru)*

**Аннотация.** В статье определен круг вопросов, возникающих при решении задач идентификации источников нефтяного загрязнения. Осуществлен выбор надежных способов идентификации нефтяных углеводородов с учетом процессов их трансформации (деградации) при попадании в окружающую природную среду (испарение, окисление, деструкция и т.п.). Исследован вещественный и элементный состав семи образцов нефти различных месторождений Ханты-Мансийского автономного округа с целью выявления характерных признаков, которые можно использовать для идентификации источника нефтяного загрязнения. Для нефтей одного географического региона показано, что применение метода капиллярной газовой хроматографии, в целях выявления значимых различий в компонентном составе, не является эффективным. В свою очередь, данные о содержании в нефтях разных месторождений примесей ряда металлов, главным образом ванадия, позволяют установить их различия, применимые для решения задач идентификации. На примере соотношений между концентрациями примесей металлов показана возможность идентификации нефтей, при которой временная трансформация не будет оказывать существенного влияния.

**Ключевые слова:** нефтяное загрязнение, источник загрязнения, идентификация нефтей, состав нефтей, деградация нефтяных углеводородов, временная трансформация, металлы-индикаторы, примеси металлов, ванадий.

## PROCEDURE FOR IDENTIFICATION OF SOURCES OF OIL POLLUTION BY THE CONTENT OF METAL IMPURITIES IN OIL

© The Author(s) 2022

**SEMENOV Vladimir Vsevolodovich**, doctor of technical sciences,  
professor of the department of engineering environmental protection

*St. Petersburg State Technological Institute  
(190013, Russia, St. Petersburg, Moskovsky prospect, 24-26/49, e-mail: semenovv50@yandex.ru)*

**IVAKHNYUK Sergey Grigorievich**, candidate of technical sciences, deputy head of research institute  
*Saint-Petersburg State Fire Service University of EMERCOM of Russia*

*(196105, Russia, St. Petersburg, Moskovsky prospect, 149, e-mail: sgi78@mail.ru)*

**MOTORYGIN Yuri Dmitrievich**, doctor of technical sciences, professor,  
professor of the department of criminalistics and engineering and technical expertise

*Saint-Petersburg State Fire Service University of EMERCOM of Russia  
(196105, Russia, St. Petersburg, Moskovsky prospect, 149, e-mail: fire-risk@mail.ru)*

**Abstract.** The article defines a range of issues that arise when solving problems of identifying sources of oil pol-

lution. The choice of reliable methods for identifying petroleum hydrocarbons has been made, taking into account the processes of their transformation (degradation) when released into the environment (evaporation, oxidation, destruction, etc.). The material and elemental composition of seven oil samples from various fields of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug was studied in order to identify characteristic features that can be used to identify the source of oil pollution. For oils of one geographic region, it has been shown that the use of the capillary gas chromatography method, in order to identify significant differences in the component composition, is not effective. In turn, data on the content of impurities of a number of metals, mainly vanadium, in oils from different fields make it possible to establish their differences applicable to solving problems of identification. Using the example of the ratios between the concentrations of metal impurities, the possibility of identifying oils is shown, in which the time transformation will not have a significant effect.

**Keywords:** oil pollution, source of pollution, identification of oils, composition of oils, degradation of petroleum hydrocarbons, temporal transformation, tracer metals, metal impurities, vanadium.

*Для цитирования:* Семенов В.В. Методика идентификации источников нефтяных загрязнений по содержанию примесей металлов в нефти / В.В. Семенов, С.Г. Ивахнюк, Ю.Д. Моторыгин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022. – Т. 11. – № 3(59). – С. 182-187. – DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0028.

**Введение.** Основной проблемой при обнаружении источников нефтяных загрязнений является установление виновника нефтяного загрязнения. Нефтяные аварийные разливы являются одним из наиболее опасных видов загрязнения природной среды. По оценкам компетентных специалистов и экспертов ООН, уже к 80-м годам прошлого столетия, растущее распространение нефтяных поллютантов нефти, являющихся основными загрязнителями Мирового океана, приобрело планетарный характер [1-3].

Особенно эта проблема актуальна в нефтяном добычном районе Ханты-Мансийского автономного округа (ХМАО) Северо-Западной Сибири, где большое количество различных нефтяных компаний ежегодно добывает более 200 млн. тонн нефти [4]. Надо отметить, что территория ХМАО равняется территории Франции. Существенные масштабы добычи нефти в автономном округе являются причиной многочисленных аварий и инцидентов на объектах бурения и добычи, а также связанной с ними инфраструктуры, которые в свою очередь провоцируют поступление поллютантов в атмо-, гидро- и педосферу [5, 6].

Ввиду отсутствия достоверных методов идентификации нефтяных углеводородов виновник подобных загрязнений окружающей среды зачастую уходит от ответственности. Стоит отметить, что здесь под идентификацией понимается установление тождественности образца нефти, полученного с места ее аварийного поступления в окружающую среду, и образца нефти из вероятного источника загрязнения.

Одним из надежных и оптимальных методов для идентификации источника, применительно к нефтяному загрязнению природных вод, в настоящее время за рубежом считается применение капиллярной газовой хроматографии (КГХ). Данный метод позволяет определять вещественный состав нефтей [7]. Существующие нормативные документы Российской Федерации: «Система идентификации нефтяных разливов на море» [8] и «Инструкция по идентификации источника загрязнения нефтью водного объекта» [9] в качестве одного из основных методов анализа также предполагают применение КГХ в различных модификациях. Применение метода КГХ основано на

предположении о том, что дифференциация нефтей разных регионов добычи определяется нахождением соотношениями содержания в них некоторых классов веществ.

Сложность проблем, связанных с установлением источников поступления нефти в окружающую среду, для ХМАО заключается не только в том, что имеется близко расположенные друг к другу объекты бурения и добычи [10], но и в неминимости окисления, деструкции, испарения и прочих видов трансформации нефти при ее попадании в природные объекты. В результате перечисленных процессов состав углеводородов нефти во времени изменяется [11-13].

Округ расположен на огромной территории, на которой большую часть года преобладают низкие температуры. Кроме того, на территории округа расположено множество озер и болот, а также протекает большое количество рек, в том числе такие великие сибирские реки, как Обь и Иртыш, воды которых в последнее время все чаще подвергаются нефтяному загрязнению. Указанные моменты объективно затрудняют решение задач идентификации нефтяных углеводородов. Существует значительная потребность в методиках, учитывающих факторы временной и биодеградации нефтей при поступлении в объекты охраны окружающей среды.

**Методология.** Основной задачей работы было исследование вещественного и элементного состава ряда образцов нефти различных месторождений ХМАО (табл. 1) с целью выявления характерных признаков, которые можно использовать для идентификации нефтей.

Таблица 1 – Пробы нефти, отобранные для исследования в ХМАО

№ пробы	Месторождение	№ пробы	Месторождение
1	Алехинское	6	Приразломное
2	Лянторское	7	Приобское
4	Красноленинское	8 (обводненная)	Петелинское
5	Трехозерное		

В соответствии с [9] было проведено исследование семи проб нефти методом капиллярной газожидкостной хроматографии с помощью хроматографа с пламенно-ионизационным детектором «Хроматэк-Кри-

сталл 5000». Применялся метод термодесорбции исследуемой пробы из трубок со стекловолокном в начальный участок капиллярной колонки охлаждаемый жидким азотом и с дальнейшим газохроматографическим анализом десорбированных веществ на пламенно-ионизационном детекторе. Тяжелые фракции нефти оставались на стекловолокне трубок, которое удалялось по завершении каждого анализа. Полученные результаты свидетельствуют, что применительно к ХМАО метод КГХ (с использованием хроматографа «Хроматэк-Кристалл 5000») не позволяет решать вопросы, связанные с определением источника нефтяного загрязнения. Сопоставление полученных хроматограмм, их низкая воспроизводимость по временам выхода и высотам пиков не дали возможности выработать надежный количественный критерий для идентификации нефтей, добываемых в данном регионе.

Альтернативным подходом к решению проблемы идентификации источников нефтяных загрязнений, по сравнению с анализом вещественного состава нефтей, является определение в пробах нефтяных разливов ряда примесей металлов [14]. Определение содержания металлов и металлорганических комплексов в нефтях может быть выполнено методами атомно-абсорбционной спектроскопии [15], рентгенофлуоресцентным [16], атомно-эмиссионным и другими аналитическими методами [17, 18]. Выбор авторов остановился на методе масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС, ICP-MS), который отличается возможностью одновременного многоэлементного анализа, низкими пределами обнаружения (около  $0,01 \text{ мкг/дм}^3$ ), большим динамическим диапазоном измерения (5–6 порядков изменения концентрации), возможностью реализации методов внутреннего стандарта и изотопного разбавления [19-21].

Результаты качественного и полуколичественного обзорного анализа методом ИСП-МС показали, что в нефтях содержатся различные металлы, а также ряд неметаллов с концентрациями от 0,1% до  $10^{-5}$  % и ниже. Для исследования возможности идентификации нефтей по содержанию металлических примесей данным методом в качестве металлов-индикаторов были выбраны ванадий, медь, никель и хром. Данный выбор обусловлен тем, что в нефтях эти металлы присутствуют в количествах, позволяющих определять их в нефти с достаточной точностью. При этом природные почвы имеют достаточно низкий фон по этим металлам, что позволяет надежно идентифицировать источник нефтяного загрязнения.

Ввиду отсутствия специального оборудования, необходимого для распространенной при решении задач диагностики металлов методом ИСП-МС в нефтях пробоподготовки с использованием органических растворителей, была выбрана классическая процедура. Она основана на разложении и окислении органических компонентов нефти минеральными кислотами в результате чего примеси металлов переводятся в разбавленный кислотный раствор. Несмотря на длительность и трудоемкость указанных манипуляций,

это позволяет, во-первых, настраивать прибор по растворам анализируемых металлов, а, во-вторых, минимизировать влияние матричных помех на процесс проведения измерений.

С учетом изложенного пробоподготовка состояла из следующих этапов. В начале навеска сырой нефти массой около 0,5 г за два прохода обрабатывалась при постепенном нагревании на песчаной бане концентрированными  $H_2SO_4$  (2 мл) и  $HNO_3$  (5 мл). Очистка кислот проводилась в кварцевом перегонном аппарате. После добавления  $H_2SO_4$  применяли следующий режим: выдержка при 40–60°C (2 часа), затем температуру поднимали до 120°C и нагревали пробу до полного испарения серной кислоты (около 1 часа). Затем, к уже охлажденной пробе, добавляли  $HNO_3$ , увеличивая температура обработки сначала до появления гомогенного раствора (60°C), после чего пробу выпаривали до объема 1–2 мл при 100°C. После охлаждения пробу переносили в мерную колбу. Полученный раствор разбавлялся дистиллированной водой в 10 раз. В зависимости от содержания анализируемых металлов объем дозирования в электротермический атомизатор составлял 10–40 мкл. Параллельно аналогичная процедура осуществлялась в отношении холостой пробы. В каждый анализируемый раствор добавлялся индий в качестве внутреннего стандарта с концентрацией в растворе  $100 \text{ мкг/дм}^3$ .

Измерения проводились на спектрометре ИСП-МС «Agilent 7900». Использовались, рекомендованные в документации на прибор, стандартные условия измерений. Градуировка прибора осуществлялась по многоэлементным стандартным растворам 0,5%  $HNO_3$  для каждого из анализируемых элементов (с концентрациями 20, 50 и  $100 \text{ мкг/дм}^3$ ). Для реализации принципа внутреннего стандарта в каждый стандарт добавлялся индий с концентрацией в пробе  $100 \text{ мкг/дм}^3$ . Для приготовления градуировочных многоэлементных растворов весовым методом разбавляли 0,5%  $HNO_3$  из основных стандартных растворов для каждого элемента с концентрацией  $1 \text{ г/дм}^3$ . Основные стандарты для каждого элемента изготавливались растворением чистых металлов в  $HNO_3$ . Проведение анализа разбавленных проб с низкой минерализацией (не более 0,5 %) обеспечило высокую сходимость результатов измерения. Относительное среднеквадратичное отклонение для четырех параллельных измерений (содержание анализируемых металлов в диапазоне от 10 до  $100 \text{ мкг/дм}^3$ ) не превышало 5%. Воспроизводимость результатов измерений определялась, в основном, погрешностями процедуры пробоподготовки и составляла в среднем 15% относительного среднеквадратичного отклонения для пяти параллельных проб нефти.

Правильность результатов измерений контролировалась по интерпретации масс-спектров с помощью анализа соотношений интенсивностей линий для разных изотопов каждого определяемого элемента (при этом учитывалось природное распределение изотопов и эффективность их ионизации), а также применени-

ем метода стандартных добавок и разбавлений. Для повышения точности определения содержания металлов в нефтях реализовывался принцип внутреннего стандарта, учитывающий временную нестабильность характеристик масс-спектрометра. Анализировались от трех до пяти параллельных проб нефти для каждого месторождения. За окончательный результат принималось среднее значение. Результаты контроля точности измерений показали, что погрешность определения содержания металлов в пробах нефтей, в основном, определяется погрешностями процедуры пробоподготовки.

**Результаты и обсуждение.** В таблице 2 представлены результаты диагностики нахождения примесей  $V$ ,  $Ni$ ,  $Cu$  и  $Cr$  в образцах нефти. Как видно из полученных результатов содержания металлов в изученных образцах нефти варьирует в широких пределах. По суммарному значению концентраций примесей металлов исследованные нефти можно условно раз-

делить на три группы: с высоким содержанием ( $> 40$  мг/кг) – пробы №№ 1, 2, 7; ко второй ( $10$  мг/кг  $< \sum < 40$  мг/кг) – пробы №№ 5, 6, 8; к третьей ( $< 10$  мг/кг) – проба № 4.

Результаты измерений показывают, что в случае анализа проб чистой нефти (не подвергнувшихся временной трансформации) для надежной идентификации источника загрязнения в большинстве случаев достаточно использовать один критерий – содержание в нефти ванадия. Для исследованных проб нефти, только для двух образцов № 6 и № 8 наблюдается близкие содержания ванадия, в пределах 10%.

Простым, но эффективным приемом для идентификации нефтяных загрязнений в случае временной трансформации нефти или ее разбавления при попадании в почву или воду является использование отношений содержаний металлов-индикаторов, что для исследованных образцов нефти визуализировано на рисунке 1.

Таблица 2 – Содержание металлических примесей в нефтях различных месторождений, мг/кг ( $10^{-4}$  % массовых)

Элемент	Проба							
	1	2	4	5	6	7	8	
V	37	47	0,7	4,2	19	28	21	
Ni	14	12	1,5	12	7,2	11	3,4	
Cu	1,1	1,5	0,3	6,0	1,3	2,4	1,5	
Cr	0,8	1,1	0,4	3,6	4,6	3,4	0,9	
$\Sigma$	52,9	61,6	2,9	25,8	32,1	44,8	26,8	

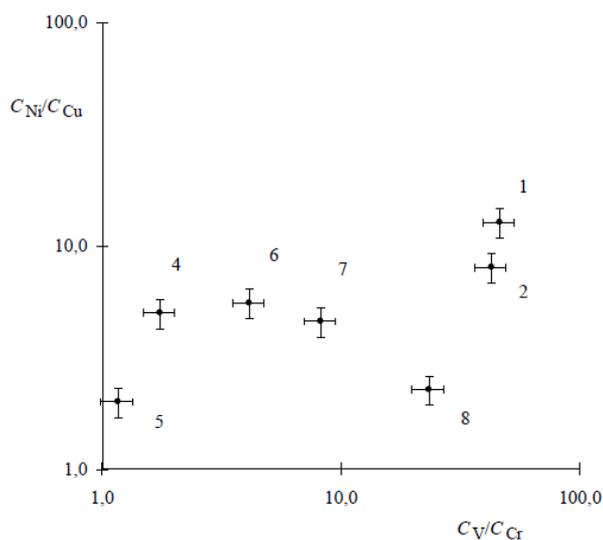


Рисунок 1 – Зависимости парных отношений концентраций металлов-индикаторов  $C_{Ni}/C_{Cu} = f(C_V/C_{Cr})$  для нефтей различных месторождений ХМАО

Как видно, все пробы нефти разных месторождений однозначно различаются по значениям параметров идентификации даже с учетом 10% интервала варьирования содержаний металлов-индикаторов в нефтях, соответствующего порогу дискриминации для выявления неидентичных проб [9]. Использование отношений содержаний различных металлов позволяет также учесть возможные погрешности определения металлов, связанные с потерями металлов на стадии пробоподготовки и более точно идентифицировать различные нефти.

Для оценки значимости влияния временной деградации нефтей на возможность их идентификации была проведена специальная обработка проб нефти, имитирующая воздействие солнечной радиации и ветра, аналогичная процедуре, изложенной в [8].

Обработка заключалась в облучении проб нефти жестким ультрафиолетом (мощность лампы 1000 Вт) в течении 60 минут. При облучении пробы нефти располагались на расстоянии 40 – 50 см от лампы, температура поверхности пробы составляла примерно 90°C.

В таблице 3 приведены результаты определения металлов в пробах исходной и облученной ультрафиолетом нефти, а также результаты статистической обработки результатов измерительной информации. Как видно из представленных данных, временная деградация нефтей не оказывает значительного влияния на возможность их идентификации в случае применения в качестве характеристических параметров значений содержания примесей металлов. Под влиянием ультрафиолетового воздействия и нагревания металлы несколько концентрируются в нефтях, однако, соотношения между ними остается прежним, в пределах погрешности определения. Использование отношений содержаний металлов позволяет однозначно определить идентичные пробы для всех нефтей, независимо от фракционного состава нефти и степени концентрирования металлических примесей при облучении ультрафиолетом.

трафиолетового воздействия и нагревания металлы несколько концентрируются в нефтях, однако, соотношения между ними остается прежним, в пределах погрешности определения. Использование отношений содержаний металлов позволяет однозначно определить идентичные пробы для всех нефтей, независимо от фракционного состава нефти и степени концентрирования металлических примесей при облучении ультрафиолетом.

Таблица 3 – Содержание металлических примесей в пробах исходной и облученной (\*) нефти, мг/кг ( $10^{-4}$  % массовых) и результаты статистической обработки

Элемент / параметр	Проба					
	5	5*	6	6*	7	7*
V	4,2	4,6	19	23	28	35
Ni	12	15	7,2	8,1	11	14
Cu	6,0	7,9	1,3	2,3	2,4	3,9
Cr	3,6	4,6	4,6	5,5	3,4	3,9
$C_V / C_{Cr}$	1,2	1,0	4,1	4,2	8,2	9,0
$C_{Ni} / C_{Cr}$	3,3	3,3	1,6	1,5	3,2	3,6
$C_{Cu} / C_{Cr}$	1,7	1,7	0,3	0,4	0,7	1,0

Для экспериментальной оценки влияния матрицы (солевого состава почвы) на возможность идентификации нефтей было проведено определение содержания V и Ni в загрязненной нефтью пробе почвы. Процедура пробоподготовки была аналогична процедуре, используемой при анализе чистых нефтей, за исключением большей массы навески пробы и в проведении фильтрования пробы после кислотной обработки. Из-за отсутствия данных о фоновых содержаниях металлов в почве, для оценки влияния матрицы на возможность идентификации нефтей был применен метод стандартных добавок. Полученные соотношения между содержаниями V и Ni в пробе почвы загрязненной нефтью и в пробе исходной нефти отличаются незначительно, в пределах погрешности измерения, что говорит о принципиальной возможности идентификации источника загрязнения по содержанию в нефти металлических примесей. Для более надежного определения источника загрязнения необходимо проводить сопоставление результатов определения содержания металлов-индикаторов для проб чистой почвы (определение фоновых концентраций) и почвы загрязненной нефтью. При малом содержании нефти в почве (менее 1% по массе) возможно использование процедуры экстракционного извлечения нефтепродуктов из почвы с определением содержания металлов в экстракте нефтепродуктов.

Полученный экспериментальный материал, по нашему мнению, может быть успешно использован не только для идентификации источников нефтяных загрязнений, но и при выявлении и исследовании объектов, изъятых с мест пожаров и взрывов.

**Выводы.** В случае нефтей, добываемых в одном географическом регионе, выявление значимых различий в их компонентном составе методом капиллярной газовой хроматографии не является эффективным. Сведения о содержании в нефтях разных месторожде-

ний примесей ряда металлов, главным образом ванадия, позволяет установить различия, применимые для решения задач их идентификации. На примере использования соотношений между концентрациями примесей металлов показана возможность идентификации нефтей, при которой временная трансформация не будет оказывать существенного влияния на результат. Для обеспечения достоверности результатов определения источника нефтяного загрязнения почвы по содержанию в нефтях примесей металлов необходимо учитывать их фоновый уровень. Учитывая минимальное фоновое содержание ванадия в почвах именно этот элемент должен стать основным при разработке соответствующей аналитической методики.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Jeffrey, L.M. Petroleum residues in the marine environment // Elsevier Oceanography Series. – Elsevier, 1980. – Т. 27. – С. 163-179.
2. Немировская, И.А. Нефть в океане (загрязнение и природные потоки) / И.А. Немировская ; Российская Академия Наук, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. – Москва : Научный мир, 2013. – 432 с. – ISBN 978-5-91522-352-2.
3. Картамышева, Е.С. Загрязнение мирового океана нефтью и нефтепродуктами / Е.С. Картамышева, Д.С. Иванченко // Молодой ученый. – 2018. – № 25(211). – С. 20-23.
4. Рядинский, А.А. Оценка промышленной безопасности на нефтяных месторождениях (на примере Ханты-Мансийского автономного округа) / А.А. Рядинский, Л.А. Казанцева // Культура и экология – основы устойчивого развития России. Человеческий капитал как ключевой ресурс зеленой экономики. Часть 1: материалы международного форума (Екатеринбург, 13-16 апреля 2018 г.). — Екатеринбург: УрФУ, 2018. — С. 124-127.
5. Сезонная динамика накопления нефтепродуктов в поверхностных водоемах Ханты-Мансийского района / С.Н. Русак, М.И. Куриленко, Т.И. Хоменушко, М.И. Куропаткина // Сложность. Разум. Постнеклассика. – 2017. – № 4. – С. 51-58. – DOI 10.12737/article\_5a1c01bf5f9584.14292623.
6. Ивахнюк, С. Г. Идентификация источников нефтяных загрязнений по составу радионуклидов уранового и ториевого рядов / С. Г. Ивахнюк, Ф. В. Демехин // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2014. – № 3(31). – С. 1-11.

7. Salder, D.A. / PONA Analysis by Gas Chromatography. Gulf Coast Instrumental Analysis Group. 69th Meeting. 1980.
8. Инструкция по идентификации источника загрязнения водного объекта нефтью. – М. – 1994. 84 с.
9. РД 52.10.243-92. Руководство по анализу морских вод. Система идентификации нефтяных разливов в море. – СПб. – 1993. С. 248-263.
10. Трудная нефть Югры / Д.А. Метт, В.Д. Немова, К.А. Щекотин [и др.] // Территория Нефтегаз. – 2020. – № 5-6. – С. 26-29.
11. Идрисов, Т.С. Дegradaция компонентов сырой нефти и нефтепродуктов в загрязненной морской воде под действием УФ-света / Т.С. Идрисов, М.А. Курбанов, У.А. Кулиева // Химическая безопасность. – 2018. – Т. 2. – №. 2. – С. 106-111.
12. Путилина, В.С. Трансформация нефти и нефтепродуктов в почвах, горных породах, подземных водах. Загрязнение, инфильтрация, миграция, деградация. Метаболиты / В.С. Путилина, И.В. Галицкая, Т.И. Юганова // Экология. Серия аналитических обзоров мировой литературы. – 2019. – №. 108. – С. 1-112.
13. Blumer M., Sass J. Oil pollution: persistence and degradation of spilled fuel oil // Science. – 1972. – Т. 176. – №. 4039. – С. 1120-1122.
14. Выбор оптимальных методов и их приборного обеспечения для решения проблемы идентификации источников нефтяных загрязнений / В.В. Семенов, О.Ю. Бегак, Г.К. Ивахнюк, А.Б. Дмитриевский // Экология энергетика экономика (выпуск IX). Промышленная и пожарная безопасность. – Межвуз. Сб. науч. Тр. – СПб. – Изд-во Менделеев. – 2005. С. 118-120.
15. Cantle J.E. (ed.). Atomic absorption spectrometry. – Elsevier, 1986.
16. Ojeda N. et al. Determination of V, Fe, Ni and S in petroleum crude oil by total-reflection X-ray fluorescence // Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy. – 1993. – Т. 48. – №. 2. – С. 247-253.
17. Quimby B.D., Dryden P.C., Sullivan J.J. Selective detection of volatile nickel, vanadium, and iron porphyrins in crude oils by gas chromatography-atomic emission spectroscopy // Journal of High Resolution Chromatography. – 1991. – Т. 14. – №. 2. – С. 110-116.
18. Zeng Y., Uden P.C. High temperature gas chromatography-atomic emission detection of metalloporphyrins in crude oils // Journal of High Resolution Chromatography. – 1994. – Т. 17. – №. 4. – С. 223-229.
19. Pereira J.S.F. et al. Determination of metals and metalloids in light and heavy crude oil by ICP-MS after digestion by microwave-induced combustion // Microchemical Journal. – 2010. – Т. 96. – №. 1. – С. 4-11.
20. Walkner C. et al. Multi-element analysis of crude oils using ICP-QQQ-MS // Organic Geochemistry. – 2017. – Т. 103. – С. 22-30.
21. Olsen S.D. et al. Determination of trace elements in petroleum exploration samples by inductively coupled plasma mass spectrometry and instrumental neutron activation analysis // Analyst. – 1995. – Т. 120. – №. 5. – С. 1379-1390.

*Статья поступила в редакцию 15.08.2022*

*Статья принята к публикации 16.09.2022*

УДК 629.45

DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0029

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ И ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ «СЕРОЙ» ВОДЫ В ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНАХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

© Автор(ы) 2022

SPIN: 8175-3786

AuthorID: 1132385

ORCID: 0000-0001-5576-0996

**АРСЕНТЬЕВА Елена Александровна**, аспирант

*Российский университет транспорта*

*(127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, д.9, стр.9, e-mail: lenakurmonova@mail.ru)*

SPIN: 2224-3967

AuthorID: 1038160

ORCID: 0000-0003-4553-2759

**КОНОВАЛ Инна Алексеевна**, аспирант, ассистент кафедры «Химия и инженерная экология»

*Российский университет транспорта*

*(127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, д.9, стр.9, e-mail: konovalinna@yandex.ru)*

**Аннотация:** В современном мире комфортные и безопасные перевозки на железнодорожном транспорте пользуются большим спросом. В связи с ростом спроса на пассажирские перевозки реализуется совершенствование пассажирского состава, что в свою очередь влечет увеличение водопотребления на железнодорожном транспорте, в следствии которого происходит неблагоприятное воздействие на окружающую среду. Сброс использованной воды в поверхностные воды приводит к экологическим и санитарным проблемам. Большую часть использованной воды в вагонах поездов можно использовать повторно, что снизит загрязнение окружающей среды и позволит реже производить дозаправку баков железнодорожных вагонов водой. Для этого необходимо совершенствовать систему водоснабжения вагонов поездов, с помощью внедрения устройства очистки и обеззараживания «серой» воды (УОСВ), которое позволяет использовать отработанную воду в экологически чистых туалетных комплексах (ЭЧТК). Полный срок службы УОСВ (без учёта источника УФ излучения и фильтрующей загрузки) – 20 лет. В статье подробно представлена схема системы водоснабжения пассажирских вагонов постройки Тверского вагоностроительного завода, рассмотрена необходимость установки УОСВ, представлен состав УОСВ, режим работы УОСВ, а также результаты химических исследований водопроводной воды после очистки УОСВ.

**Ключевые слова:** железнодорожный транспорт, пассажирские вагоны, водоснабжение вагонов, очистка и обеззараживание воды, устройство очистки и обеззараживания «серой» воды, УОСВ.

## MODERN TECHNOLOGIES OF PURIFICATION AND DISINFECTION OF "GRAY" WATER IN PASSENGER CARS OF RAILWAY TRANSPORT

© The Author(s) 2022

**ARSENTIEVA Elena Aleksandrovna**, phd student

**KONOVAL Inna Alekseevna**, phd student, assistant of the Department of Chemistry and Engineering Ecology

*Russian University of Transport*

*(127994, Russia, Moscow, Obraztsova str., 9, p.9, e-mails: lenakurmonova@mail.ru, konovalinna@yandex.ru)*

**Abstract.** In the modern world, comfortable and safe transportation by rail is in great demand. In connection with the growing demand for passenger transportation, the improvement of passenger traffic is being implemented, which in turn entails an increase in water consumption on railway transport, as a result of which there is an adverse impact on the environment. The discharge of used water into surface waters leads to environmental and sanitary problems. Most of the used water in train cars can be reused, which will reduce environmental pollution and allow less frequent refueling of tanks of railway cars with water. To do this, it is necessary to improve the water supply system of train cars, through the introduction of a device for cleaning and disinfection of "gray" water (UOSV), which allows the use of waste water in environmentally friendly toilet complexes (ECTC). The full service life of the UOSV (excluding the source of UV radiation and filter loading) is 20 years. The article presents in detail the scheme of the water supply system for passenger cars built by the Tver Carriage Building Plant, the need for the installation of UOSV is considered, the composition of the UOSV, the operating mode of the UOSV, as well as the results of chemical studies of tap water after purification of the UOSV are presented.

**Keywords:** railway transport, passenger cars, water supply of cars, purification and disinfection of water, device for purification and disinfection of "gray" water, UOSV.

*Для цитирования:* Арсентьева Е.А. Современные технологии очистки и обеззараживания «серой» воды в пассажирских вагонах железнодорожного транспорта / Е.А. Арсентьева, И.А. Коновал // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022. – Т. 11. – № 3(59). – С. 188-192. – DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0029.

**Введение.** Одним из главных видов транспорта в России на сегодняшний день является железнодорожный транспорт. Все объекты железнодорожного транспорта в высокой степени воздействуют на окружающую среду, и являются источниками загрязнения природы отработанными продуктами производства.

Объекты железной дороги являются крупными потребителями воды. Железнодорожный транспорт пользуется высоким спросом на свои услуги, объем перевозок постоянно растет, строятся новые сети железных дорог, поэтому и объем водопотребления постоянно увеличивается.

Частично вода, потребляемая в пассажирских вагонах, расходуется безвозвратно. Большую часть использованной воды можно собирать и использовать повторно. Но на сегодняшний день на предприятиях железнодорожного транспорта только треть воды используется для повторного и оборотного водоснабжения, а остальную воду после однократного использования сбрасывают в поверхностные водоемы. Таким образом происходит обширное загрязнение водных объектов сточными водами, которые содержат в себе большие концентрации высоко опасных соединений. Эти опасные соединения пагубно влияют не только на водные объекты, в которых отравляют живые существа, но и токсически действуют на человека, который использует эту воду для хозяйственно-бытовых нужд.

В настоящее время проблема повторного использования «серой» воды на железнодорожном транспорте рассматривается впервые. За последние 5 лет рассматривались аспекты обеспечения санитарно-гигиенической и противоэпидемической безопасности железнодорожного подвижного состава с использованием сантехнических систем замкнутого типа в исследованиях Сачковой О.С. (Юдаевой), Канунникова О.В., Аксельрода В.А., Алехина С.Ю., а также система

очистки серой воды рельсового транспортного средства Кикнадзе Н.Д.

**Методология.** Повторное использование «серой» воды поможет снизить нагрузку на окружающую природу, а также позволит реже производить дозаправку баков железнодорожных вагонов водой. Для этого необходимо предусмотреть систему обеззараживания воды с возможностью ее повторного использования в вагонах поездов.

Усовершенствование систем водоснабжения вагонов поездов относится к комплексу организационно-технических мероприятий, проводимых в области эксплуатации транспортных средств. Для решения проблемы с повторным использованием «серой» воды, а также экологических, экономических и технических проблем развития производства создаются новые инновационные технологии благодаря достижениям научно-технического прогресса. Эти технологии не наносят вред окружающей среде, являются экологически чистыми. К ним относятся санитарно-техническое оборудование системы водоснабжения вагонов, которые обеспечивают необходимые условия гигиены и питания людей в дальних поездках. Каждый вагон оснащен такой системой, и поэтому в поездках пассажиры обеспечены питьевой и технической водой. Система периодически заправляется в моменты остановок поезда. На рисунке 1 представлена схема системы водоснабжения пассажирских вагонов ТВЗ.

**Результаты.** При использовании усовершенствованной схемы водоснабжения пассажирского вагона устройство обеззараживания «серой» воды (VOCB) обеспечит прием, грубую и тонкую очистку воды, а также обеззараживание воды ультрафиолетовым излучением, подачу на унитазы экологически чистых туалетных комплексов (ЭЧТК) воду с параметрами согласно таблицам 1, 2, 3.

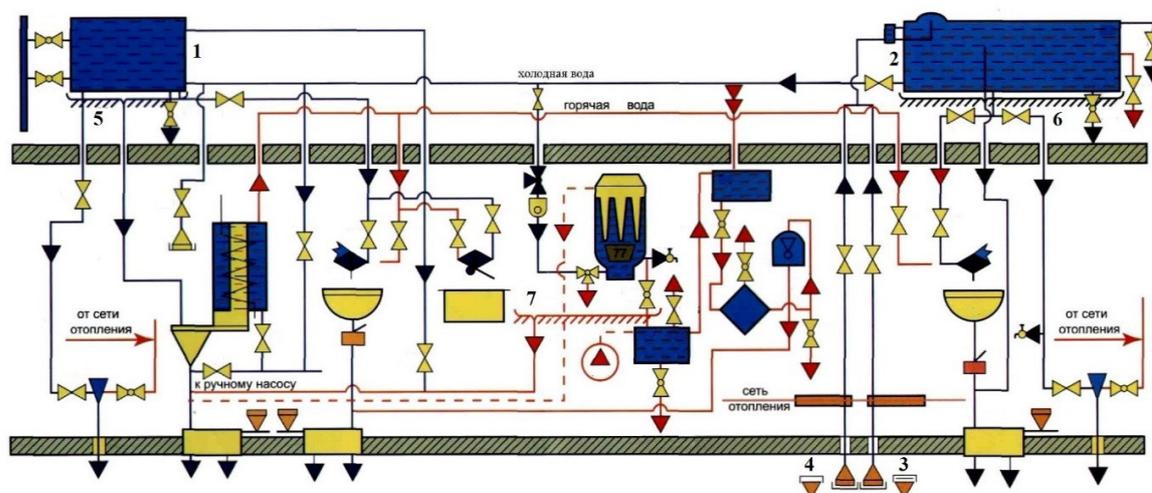


Рисунок 1 – Схема системы водоснабжения пассажирских вагонов постройки ТВЗ

- 1 – малый бак, вместимостью 80 л
- 2 – большой бак, вместимостью 850 л.
- 3, 4 – наливные головки с обогревателем
- 5, 6, 7 – поддоны

Таблица 1 – Требования к микробиологическим показателям воды на выходе УОСВ

Показатели	Единицы измерения	Нормативы
Термотолерантные колиформные бактерии	число бактерий в 10 мл	отсутствие
Общие колиформные бактерии	число бактерий в 10 мл	отсутствие
Общее микробное число	число образующих колонии бактерий в 1 мл	не более 500

Таблица 2 – Требования к физико-химическим показателям воды на выходе УОСВ

Показатели	Единицы измерения	Нормативы (ПДК), не более
Водородный показатель	единицы pH	в пределах 6-10
Общая минерализация (сухой остаток)	мг/л	1000 (1500)
Жесткость общая	мг-экв./л	7,0 (10)
Окисляемость перманганатная	мг/л	10-100
Поверхностно-активные вещества (ПАВ), анионоактивные	мг/л	5-10

Таблица 3 – Требования к органолептическим показателям воды на выходе УОСВ

Показатели	Единицы измерения	Нормативы, не более
Запах	баллы	3
Цветность	градусы	50
Мутность	ЕМФ (единицы мутности по формазину) или мг/л (по каолину)	30

Система повышения давления УОСВ обеспечит подачу воды из бака накопителя под давлением от 1,2 до 2,2 атм объемом не менее 1,0 л/мин на каждый унитаз туалетной системы.

Максимальное время работы насосов перекачки серой воды на систему тонкой очистки – не более 3 мин, работа циркуляционного насоса – непрерывно при наличии воды в баке-накопителе.

На каждый вагон должна устанавливаться одна

УОСВ, которая может применяться для обеспечения смыва не более трех унитазов ЭЧТК.

Полный срок службы УОСВ (без учёта источника УФ излучения и фильтрующей загрузки) – 20 лет.

Результаты исследований химических данных показали, что параметр запаха при 20°C отклоняется от нормы и превышает на один балл, для этого возможна установка дополнительных фильтров. По основным параметрам устройство соответствует нормативам.

Таблица 4 – Результаты химических исследований водопроводной воды после очистки УОСВ

Результаты исследований					
№ п/п	Наименование показателя	Результат испытаний с характеристикой погрешности, X±Δ	Единицы измерений	Норматив	НД на метод испытаний
1	2	3	4	5	6
1	Водородный показатель (pH)	6,46±0,20	ед.pH	6-9	ПНД Ф 14.1:2:3:4, 121-97, изд. 2018 г.
2	Жесткость	0,39	°Ж	7	ГОСТ 31954-2012 метод А, изд. 2013 г.
3	Запах при 20 °С	3	баллы	2	ГОСТ Р 57164-2016, изд. 2016 г.
4	Мутность	Менее 0,25	ЕМФ	2,6	ГОСТ Р 57164-2016, изд. 2016 г.
5	Перманганатная окисляемость	2,10±0,21	мг/дм³	5	ПНД Ф 14.1:2:4, 154-99, изд. 2012 г.
6	Поверхностно-активные вещества анионные (АПАВ)	2,6±0,5	мг/дм³	0,5	ПНД Ф 14.1:2:4.158-2000, изд. 2014 г.
7	Сухой остаток	менее 50	мг/дм³	1000	ПНД Ф 14.1:2:4.114-97, изд.2011 г.
8	Цветность	менее 1	градус	30	ГОСТ 31868-2012, изд.2014 г.

**Обсуждение.** Для очистки и обеззараживания «серой» воды необходимо предусмотреть УОСВ, которое предназначено для очистки и обеззараживания «серой» воды в системе водоснабжения вагона с целью ресурсосбережения и создания возможности ее повторного использования в экологически чистом туалетном комплексе при смыве.

УОСВ предназначена для установки на систему промывки туалета с применением «серой» воды для двухэтажного купейного штабного вагона модели 61-4524 производства ОАО «ТВЗ».

Разработчиком УОСВ является ООО «ЛитТранс-Сервис».

УОСВ может эксплуатироваться при температуре окружающего воздуха не ниже плюс 10 °С.

На вагоне устанавливается одна УОСВ, которая размещается в туалетных отделениях первого и второ-

го этажа, в том числе в туалете инвалида.

УОСВ состоит из следующих элементов:

1. Модуль приема и фильтрации с установленными в нем:

- фильтром грубой очистки;
- первичным сборником «серых стоков» объемом не менее 3 литров;
- насосом перекачки серой воды на систему тонкой очистки и в модуль накопления, обеззараживания и раздачи.
- системой тонкой очистки.

2. Модуль накопления, обеззараживания и раздачи с установленными в нем:

- системой доочистки и обеззараживания, обеспечивающей выполнение циркуляционного цикла;
- баком накопителем объемом не менее 20 литров;
- системой повышения давления для подачи на по-

вторное использование;

– системой датчиков, регулирующих работу УОСВ.

Модули приема и очистки встраиваются в водосток раковины и обеспечивают прием и грубую очистку «серой» воды. Тонкая очистка, обеззараживание и хранение воды для ее последующей подачи на смыв ЭЧТК производится в модуле накопления, обеззараживания и раздачи, который устанавливается в надпотолочном пространстве второго этажа салона вагона (рис. 2).

Вода из бака чистой воды вагона используется для заполнения верхнего модуля только при условии отсутствия серой воды в модулях приема и очистки.

Вода из умывальных комплексов вагона распределяется в модули приема и очистки УОСВ. Затем вода поступает для последующей очистки и обеззараживания. Обеззараживание воды происходит в компактном обеззараживателе воды, за счет воздействия на микроорганизмы бактерицидного УФ излучения. Вода подается потребителю из модуля накопления, обеззараживания и раздачи по сигналу на слив воды ЭЧТК.

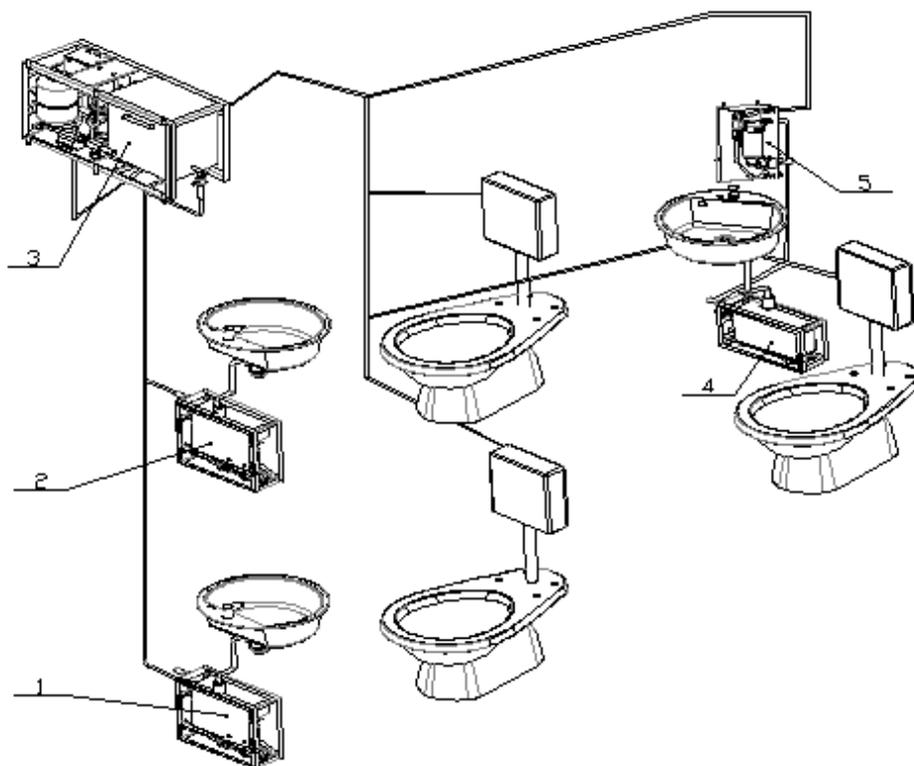


Рисунок 2 – Общий вид и размещение УОСВ на вагоне

- 1 – Модуль приема и очистки (для туалета первого этажа) (далее- МПО1)
- 2 – Модуль приема и очистки (для туалета второго этажа) (далее- МПО2)
- 3 – Модуль накопления, обеззараживания и раздачи воды (далее- МНОР)
- 4 – Модуль приема и очистки (туалет инвалида) нижний (далее- МПОИ1)
- 5 – Модуль приема и очистки (туалет инвалида) верхний (далее МПОИ2)

Режим работы УОСВ следующий: Вода самотеком через фильтр грубой очистки подается в первичный сборник «серых стоков». Очищенная от грубых механических примесей вода из первичного сборника посредством насоса перекачки поступает на фильтр тонкой очистки. Очищенная от твердых включений и растворенного мыла вода поступает на систему доочистки и обеззараживания ультрафиолетовым излучением. Обеззараженная вода поступает в бак накопитель модуля накопления, обеззараживания и раздачи очищенной воды (рис. 2). Для исключения повторного роста микроорганизмов в модуле накопления обеспечивается режим циркуляции воды. Вода подается по месту ее повторного использования при помощи системы повышения давления. При отсутствии достаточного количества «серой воды»

предусмотрена возможность подачи в модуль накопления воды из системы водоснабжения вагона. Подача воды из системы водоснабжения в модуль накопления исключает возможность подачи неочищенной воды в систему водоснабжения и ее бактериальное заражение. При избытке «серой воды» в модуле приема предусмотрена возможность автоматического слива избыточного количества стоков под вагон. Так же обеспечен слив воды из системы УОСВ без разборки системы. В УОСВ предусмотрена возможность оперативной промывки и замены фильтрующих элементов. В случае выхода из строя (засора) фильтра или отсутствия фильтрующего элемента, происходит автоматический слив под вагон. При восстановлении корректной работы фильтра, происходит автоматический перевод системы в

штатный режим с фильтрацией «серой» воды.

**Выводы.** Первые туалетные системы со смывом появились более века назад. А в конце XX века появились первые системы, задерживающие слив стоков на пути в городах и остановках пассажирского подвижного состава. Развитие и улучшение систем железнодорожного транспорта продолжается и в XXI веке. По результатам проведенных исследований установлено, что «серая» вода после установки и обеззараживания устройством очистки и обеззараживания «серой» воды в основном соответствует требованиям санитарных правил СП 2.5.3650-20 «Санитарно-эпидемиологические требования к отдельным видам транспорта и объектам транспортной инфраструктуры», Единым санитарно-эпидемиологическим и гигиеническим требованиям к товарам, подлежащим санитарно-эпидемиологическому надзору и может применяться для повторного использования в экологически чистом туалетном комплексе двухэтажных пассажирских вагонов локомотивной тяги (смыв унитазов).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Степанова, И. В. Санитария и гигиена питания: учебное пособие / И. В. Степанова. – Санкт-Петербург: Троицкий мост, 2014. – 224 с.
2. Широков, Ю.А. Экологическая безопасность на предприятии: учебное пособие для вузов / Ю.А. Широков. — 3-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 360 с.
3. СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества (взамен СанПиН 2.1.4.559-96).
4. Попов Н.С., Святенко А.В., Киреев Е.И. Классификация методов контроля качества природных вод / Журнал «Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского», 2013. С. 245-261.
5. Сачкова О.С., Аксенов В.А, Коновал И.А., Шевченко В.Б. Разработка технических, санитарно-гигиенических и экологических требований к шторе, предназначенной для организации индивидуального пространства в пассажирских вагонах открытого типа // Технология текстильной промышленности. – 2019. – №3 (381). – С. 228-232.
6. Сачкова О.С., Шевченко В.Б. Обеспечение санитарно-гигиенической безопасности при эксплуатации изделий съемного мягкого имущества в пассажирских вагонах // Проблемы безопасности российского общества. – 2019. – №3. – С. 81-90.
7. Родионова О.М., Аникина Е.В., Лавер Б.И., Семенов Д.А. Медико-биологические основы безопасности. Охрана труда. Учебник для вузов. М.: 2-е издание, 2021.
8. Высотин С.А., Сайфитова А.Т., Хацков М.В., Рязанова Е.А. Железнодорожный транспорт как источник загрязнения объектов водной среды // Международный студенческий научный вестник. – 2017. – №6. – С.7.
9. Беленикина Е.С. Разработка и применение системы автоматизации для повышения информационной надежности экологического мониторинга окружающей среды // Экологические системы и приборы. – 2012. – №3. – С.43-52.
10. Скалозубова, Л. Е. Негативные факторы техносферы: практикум по безопасности жизнедеятельности : учебное пособие / Л. Е. Скалозубова, Л. Г. Овчарова, Н. В. Немолочная. – Кемерово: КемГУ, 2012. – С. 218.
11. Пятанова П.А., Щевцова Н.Е. Определение органолептических и химических показателей колодезной воды и ее очистка // Международный журнал гуманитарных и естественных наук 2019. – №7-1. – С.169-173.
12. Коновал И.А., Лагунин Е.О. Необходимость внедрения современного оборудования по вторичному использованию «серой» воды в пассажирских вагонах // Современные подходы к обеспечению гигиенической,

санитарно-эпидемиологической и экологической безопасности на железнодорожном транспорте. – 2022. – 5-ый выпуск. – С.63-67.

13. Арсентьева Е.А. Обеспечение экологической и санитарно-гигиенической безопасности пассажирских вагонов за счет использования полимерных и полимерсодержащих конструкционных и отделочных материалов // Современные подходы к обеспечению гигиенической, санитарно-эпидемиологической и экологической безопасности на железнодорожном транспорте. – 2022. – 5-ый выпуск. – С.118-127.

14. Сачкова О.С., Арсентьева Е.А. Обеспечение экологической безопасности пассажирских вагонов локомотивной тяги / О.С. Сачкова, Е.А. Арсентьева // Проблемы безопасности российского общества. – 2021. – № 1(71) – С. 72-76.

15. Патент №2749052 С1 РФ. Система очистки серой воды рельсового транспортного средства: №2020126781 : заявл. 11.08.2020 : опубл. 03.06.2021 / Н.Д. Кикнадзе / Общество с ограниченной ответственностью «ЛитТрансСервис».

16. Арсентьева Е.А., Коновал И.А. Обеспечение эпидемиологической и экологической безопасности работников поездных бригад за счет совершенствования систем жизнеобеспечения / Е.А. Арсентьева, И.А. Коновал // Производство. Технология. Экология (ПРОТЭК'21) – 2021 – Сборник трудов. – Выпуск 22.

17. Михальченко, Т. С. Обеззараживание воды с помощью ультрафиолетового излучения / Т.С. Михальченко, А.О. Шардина, Л.Ш. Юлдашова // 60 лет снимкам обратной стороны Луны, Иркутск, 2019 год. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2019. – С. 113-118.

18. СанПиН 2.1.3684-21 Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий.

19. СП 2.5.3650-20 «Санитарно-эпидемиологические требования к отдельным видам транспорта и объектам транспортной инфраструктуры».

20. Цховребов, Э.С. Охрана окружающей среды на железнодорожном транспорте: Монография. 2-е издание переработанное и дополненное (первое - с тем же названием вышло в свет в 1994 году в том же издательстве) / Э.С. Цховребов; изд-во "Космосинформ". – 2-е издание переработанное и дополненное (первое - с тем же названием вышло в свет в 1994 году в том же издательстве). – Москва : Космосинформ, 1996. – 527 с.

21. Патент на полезную модель № 194282 U1 Российской Федерации, МПК В61D 35/00. Устройство очистки серой воды для рельсового транспортного средства : № 2019111129 : заявл. 13.09.2017 : опубл. 05.12.2019 / Ф. Кеммерлинг, Т. Кюбек ; заявитель СИМЕНС МОБИЛИТИ ГМБХ.

22. Арсентьева Е.А. Изучение современных технологий прессования твёрдых бытовых отходов в пассажирских вагонах / Е.А. Арсентьева // Проблемы безопасности российского общества. – 2021. – № 4(36). – С. 67-71.

*Статья поступила в редакцию 28.06.2022*

*Статья принята к публикации 16.09.2022*

УДК 665.644-027.45

DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0030

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАЧИМОСТИ КЛЮЧЕВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОПАСНОСТИ  
ПРОЦЕССА ПРИГОТОВЛЕНИЯ БУРОВЫХ РАСТВОРОВ**

© Автор(ы) 2022

ORCID: 0000-0002-2885-2489

**ИСМАГИЛОВ Миннахмат Иригович**, кандидат технических наук, доцент*Уфимский государственный нефтяной технический университет**(450064, Россия, Республика Башкортостан, г. Уфа, улица Космонавтов, 1, e-mail: IsmagilovMI@rambler.ru)*

SPIN: 2075-4704

AuthorID: 217872

ORCID: 0000-0001-7827-7294

**БАРАХНИНА Вера Борисовна**, кандидат технических наук, доцент*Уфимский государственный нефтяной технический университет**(450064, Россия, Республика Башкортостан, г. Уфа, улица Космонавтов, 1, e-mail: verarosental@rambler.ru)***ЮСУПОВА Алия Булатовна**, магистрант*Уфимский государственный нефтяной технический университет**(450064, Россия, Республика Башкортостан, г. Уфа, улица Космонавтов, 1, e-mail: hasanovaalia81@mail.ru)*

**Аннотация.** В данной статье были рассмотрены основные опасные и вредные факторы (ОВПФ), действующие на работников буровых предприятий в процессе приготовления буровых растворов (БР). Многообразие и изменчивость ОВПФ обуславливает необходимость разработки стратегии повышения безопасности процесса приготовления БР с учетом ключевых показателей безопасности. Для разработки алгоритма повышения промышленной безопасности исследуемого процесса была поставлена цель – определить значимость ключевых показателей безопасности, а также факторов, негативно влияющих на жизнь и здоровье работников, занятых процессе приготовления БР. В задачи следования входили: анализ аварийности и выявление основных ОВПФ процесса бурения; обоснование выбора ключевых факторов безопасности; разработка предложений по повышению уровня промышленной безопасности и охраны труда при приготовлении БР. Методом экспертного опроса, в котором приняли участие почти два десятка специалистов российских вертикально-интегрированных нефтяных компаний, были определены весовые значения ключевых показателей безопасности (и их подфакторов). Весовое значение характеризовало то, насколько сильно влияет тот или иной фактор на уровень безопасности процесса приготовления БР. После обработки экспертных оценок был разработан метод оценки уровня безопасности буровой установки, учитывающий все нюансы технологического процесса, а именно: технологические параметры, состояние оборудования, токсикологические и физико-химические свойства обращающихся веществ и применяемых химических буровых реагентов. Каждый ранг характеризовал степень безопасности условий труда работников буровых предприятий. В дальнейшем на основании ранжирования различных технологий приготовления БР возможна разработка мероприятий для повышения уровня охраны труда и промышленной безопасности процесса строительства скважин.

**Ключевые слова:** опасные и вредные производственные факторы, химические реагенты, строительство нефтяных и газовых скважин, промышленная безопасность, охрана труда.

**DETERMINATION OF THE SIGNIFICANCE OF KEY SAFETY INDICATORS  
OF THE DRILLING FLUID PREPARATION PROCESS**

© The Author(s) 2022

**ISMAGILOV Minnakhmat Irigovich**, associate professor**BARAKHNINA Vera Borisovna**, associate professor**YUSUPOVA Aliya Bulatovna**, master degree student*Ufa State Petroleum Technological University**(450064, Russia, Republic of Bashkortostan, Ufa, Kosmonavtov Street, 1,**e-mails: IsmagilovMI@rambler.ru, verarosental@rambler.ru, hasanovaalia81@mail.ru)*

**Abstract.** In this article, the main dangerous and harmful factors (DHF) that affect the workers of drilling enterprises in the process of preparing drilling fluids (DF) were considered. The diversity and variability of the DHF necessitates the development of a strategy to improve the safety of the DR preparation process, taking into account key safety indicators. To develop an algorithm for improving the industrial safety of the process under study, the goal was to determine the significance of key safety indicators, as well as factors that negatively affect the life and health of workers involved in the preparation of DR. The follow-up tasks included: analysis of accidents and identification of the main DHF of the drilling process; rationale for the selection of key safety factors; development of proposals to improve the level of industrial safety and labor protection in the preparation of DR. Using the method of an expert survey, which was attended by almost two dozen specialists from Russian vertically integrated oil companies, weighted values of key safety indicators (and their subfactors) were determined. The weight value characterized how strongly one or another factor influences the

safety level of the DR preparation process. After processing expert assessments, a method was developed for assessing the safety level of a drilling rig, taking into account all the nuances of the technological process, namely: technological parameters, equipment condition, toxicological and physico-chemical properties of the substances in circulation and the chemical drilling reagents used. Each rank characterized the degree of safety of working conditions for employees of drilling enterprises. In the future, based on the ranking of various DR preparation technologies, it is possible to develop measures to improve the level of labor protection and industrial safety of the well construction process.

**Keywords:** hazardous and harmful production factors, chemical reagents, construction of oil and gas wells, industrial safety, labor protection.

*Для цитирования:* Исмагилов М.И. Определение значимости ключевых показателей безопасности процесса приготовления буровых растворов / М.И. Исмагилов, В.Б. Барахнина, А.Б. Юсупова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022. – Т. 11. – № 3(59). – С. 193-198. – DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0030.

**Введение.** Безопасность процесса приготовления буровых растворов (БР) зависит от токсикологических свойств применяемых химических реагентов, рецептуры раствора (эффект суммации), параметров технологического оборудования, условий приготовления и обращения жидкостей и др. [1-6].

Обзор источников вредностей и опасностей процесса приготовления БР приведен на рисунке 1 [18, 21-24].

К химическим вредным факторам производства можно отнести буровые реагенты на основе целлюлозы, углеводов (РУО), КМЦ, карбоксиметилгидроксицеллюлозы, гидроксипропилцеллюлозы, крахмала, высших жирных спиртов, СПАВ, лигносульфонатов, ксантановой смолы, пропиленгликоля, лигнина, сульфированного асфальта, полигликолей,

гуминовых кислот, бурого угля, природных жиров, полиэтиленоксида, кислот таловых масел, фенолов, аминов, нитрилодиметилфосфоновой кислоты, трибутилового спирта, акрилатов, высших жирных кислот, квебрахо, сулькорра, окисленного лигнина, различные неорганические соли, кислоты и щелочи. Многие компоненты БР, включая соли тяжелых металлов, при попадании в организм работника действуют как метаболитные яды [13-15, 20].

Большое количество и изменчивость вредных и опасных факторов процесса обуславливает необходимость разработки стратегии повышения безопасности процесса приготовления БР с учетом ключевых показателей безопасности [7, 16] (рис. 2). Определить весовые значения ключевых показателей предлагается методом экспертного опроса.



Рисунок 1 – Анализ вредных и опасных факторов процесса приготовления БР [10, 14]

Целью данной работы явилось определение значимости ключевых показателей безопасности процесса приготовления БР для выработки стратегии повышения промышленной безопасности и охраны труда при строительстве нефтегазовых скважин.

**Методология.** Для определения числовых показателей ключевых факторов безопасности проводили опрос экспертов в области промышленной

безопасности и охраны труда при строительстве нефтяных и газовых скважин [17]. Данный метод заключался в анкетировании группы заранее подготовленных специалистов ПАО АНК «Башнефть» и ПАО «Газпром».

На основании обработки результатов анкетирования определяли количественную оценку фактора [5, 19].

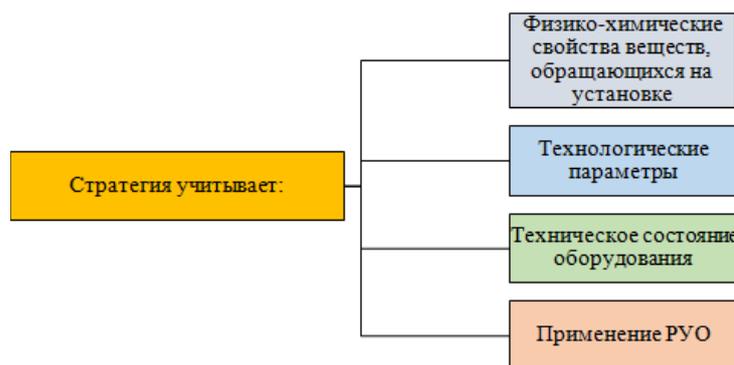


Рисунок 2 – Преимущества усовершенствованного метода оценки промышленной безопасности и охраны труда процесса приготовления БР [19, 20]

Этапы экспертного опроса: выбор экспертов, формирование вопросов; составление анкет, проведение опроса среди экспертов, анализ экспертных оценок, обработка экспертных оценок и выдача рекомендаций [6, 10-12]. Определить весовые значения ключевых показателей, оказывающих наибольшее влияние на уровень безопасности, предлагалось следующим образом: составление матрицы «эксперты-факторы», в которой проставлены балльные оценки весового значения по каждому ключевому показателю безопасности → расчет относительной значимости ключевых показателей безопасности и подфакторов для каждого эксперта → расчет средней оценки каждого ключевого показателя безопасности для группы из 15 экспертов, данного всеми экспертами в совокупности. Значение того или иного показателя специалистам предлагалось по пятибалльной шкале.

**Результаты.** Сначала эксперты определяли ключевые показатели безопасности процесса. Затем каждый ключевой показатель разбивался на подфакторы, и экспертам предлагалось оценить значимость каждого отдельного подфактора. [8]. Рассмотрим алгоритм определения весового значения каждого фактора на примере двух экспертов (табл. 1 и рис. 3).

Затем рассчитывали относительную значимость факторов для каждого эксперта. Для этого оценки, полученные от отдельного эксперта, суммировали, и высчитывали относительную значимость:  $X_{11} = 3/12 = 0,25$ ;  $X_{12} = 5/12 = 0,42$ ;  $X_{13} = 4/12 = 0,33$ ;  $X_{21} = 4/12 = 0,33$ ;  $X_{22} = 5/12 = 0,42$ ;  $X_{23} = 3/12 = 0,25$ .

Далее находили численное значение ключевого показателя безопасности – среднее арифметическое для каждого фактора.

$$X_1 = (0,25+0,33)/2 = 0,29; X_2 = (0,42+0,42)/2 = 0,42; X_3 = (0,33+0,25)/2 = 0,29.$$

Аналогично были обработаны результаты оценки всех (15) экспертов по каждому ключевому фактору. Результаты представлены на рисунке 4.

Таблица 1 – Весовые значения факторов по результатам экспертного опроса

Эксперт	Фактор		
	1 Фактор	2 Фактор	3 Фактор
1	3	5	4
2	4	5	3



Рисунок 3 – Весовые значения ключевых показателей безопасности после опроса двух экспертов



Рисунок 4 – Весовые значения ключевых показателей после обработки результатов опроса пятнадцати экспертов

Полученные данные свидетельствуют о том, что токсикологические свойства буровых реагентов (фактор 2) оказывают наиболее сильное влияние на уровень безопасности процесса приготовления БР.

Для уточнения степени влияния исследуемых ключевых показателей представлены результаты экспертного опроса по одиннадцати подфакторам (рис. 5-7).

**Обсуждение.** Полученные результаты наглядно отражают степень влияния каждого отдельного ключевого показателя безопасности и их подфакторов на уровень промышленной безопасности и охра-

ны труда процесса приготовления БР с учетом особенностей работы буровой установки. Далее осуществляли проверку согласованности суждений экспертов – определяли, насколько сильно различаются суждения специалистов. Согласованность суждений экспертов по ключевым факторам оценивали по коэффициенту конкордации. Применение данного коэффициента в рамках решаемой задачи являлось наиболее целесообразным, так как он используется при оценках в физических единицах факторов и балльных оценках. Коэффициент конкордации характеризует степень отклонения суждений экспертов от среднего значения коллективной оценки [19].

$K_{var} \leq 10\%$  – высокая согласованность мнений

экспертов;

$K_{var} \in [11-25]\%$  – средняя согласованность мнений экспертов;

$K_{var} \in [26-35]\%$  – согласованность мнений экспертов ниже средней;

$K_{var} > 35\%$  – низкая согласованность мнений экспертов.

Коэффициент конкордации (в %) вычисляли по следующей формуле:

$$K_{var} = \sigma / (C) \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $K_{var}$  – коэффициент конкордации;

$\sigma$  – среднее квадратическое отклонение оценок экспертов для данного подфактора;

$C$  – средняя весовая оценка данного подфактора всеми экспертами (среднее арифметическое).



Рисунок 5 – Весовые значения подфакторов для фактора «Технологические параметры процесса»



Рисунок 6 – Весовые значения подфакторов для фактора «Токсикологические свойства буровых реагентов»



Рисунок 7 – Весовые значения подфакторов для фактора «Техническое состояние оборудования»

Определение коэффициента конкордации проводили для каждого подфактора в отдельности. Среднее квадратическое отклонение балльных оценок специалистов для каждого отдельного подфактора рассчитывали по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_1^n (C_i - C)^2}{n}}, \quad (2)$$

где  $C_i$  – средняя весовая оценка (среднее арифметическое) данного подфактора для одного

эксперта;

$n$  – количество экспертов.

Среднее арифметическое вычисляли по формуле:

$$C = \frac{\sum_1^n C_i}{n} \quad (3)$$

Рассмотрим определение коэффициента конкордации для подфактора 1.1 «Вязкость БР» по результатам опроса всех пятнадцати экспертов ( $n = 15$ ). Результаты расчета сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Расчёт коэффициента конкордации по результатам оценки всех экспертов для подфактора 1.1 «Вязкость БР»

№ эксперта	Средняя весовая оценка подфактора 1.1 для одного эксперта ( $C_i$ ), ед.	Средняя весовая оценка подфактора 1.1 всеми экспертами ( $C$ ), ед.	Среднеквадратическое отклонение оценок экспертов для подфактора 1.1 ( $\sigma$ ), ед.	Коэффициент конкордации $K_{\text{впр}}$ , %
1	0,200	0,191	0,033	17
2	0,154			
3	0,091			
4	0,267			
5	0,286			
6	0,214			
7	0,176			
8	0,250			
9	0,273			
10	0,167			
11	0,071			
12	0,235			
13	0,083			
14	0,154			
15	0,200			

Аналогично вычисляется коэффициент конкордации для каждого подфактора, влияющего на опасность процесса приготовления БР (табл. 3).

Таблица 3 – Значения коэффициента конкордации для всех подфакторов по результатам оценки экспертов

Ключевой фактор (подфактор)	Коэффициент конкордации $K_{\text{впр}}$ , %
1. Физико-химические свойства обрабатываемых веществ	
1.1 Вязкость БР	17
1.2 pH среды	9
1.3 Количество воды на разбавление	11
1.4 Температурный режим	15
2. Технологические параметры процесса	
2.1 Присутствие в рецептуре полиакриламида	6
2.2 Наличие лигносульфонатов	7
2.3 Растворы на углеводородной основе	9
2.4 Содержание феррохромлигносульфоната	10
3. Техническое состояние оборудования	
3.1 Наличие оборудования, работающего в коррозионно-агрессивной среде	10
3.2 Наличие оборудования, подверженного абразивному износу	10
3.3 Наличие оборудования, конструкция которого не соответствует особенностям технологического процесса	11

Таким образом, по подфакторам 1.1, 1.3, 1.4 и 3.3 согласованность суждений экспертов – средняя. По остальным подфакторам – высокая. Анализ математической обработки результатов экспертного опроса позволяет предложить следующую классификацию безопасности процесса приготовления БР по четырем рангам безопасности: 1-й – сумма всех ключевых показателей 2,0 и более; 2-й – сумма всех факторов от 1,5 до 2,0; 3-й – сумма всех факторов от 1,0 до 1,5; 4-й – сумма всех факторов менее 1,0.

**Выводы.** По мнению опрошенных экспертов, токсикологические свойства буровых реагентов оказывают наибольшее влияние на уровень безопасности процесса приготовления БР. Кроме того, в результате исследования выявлено значительное влияние подфакторов 2.1. (Присутствие в рецептуре полиакриламида), 2.3 (Растворы на углеводородной основе) и 2.4 (Содержание феррохромлигносульфоната). Очевидна необходимость разработки мето-

да оценки уровня безопасности исследованного техно-логического процесса, который учитывал бы особенности приготовления буровых растворов, а именно – применение безопасных химических реагентов. Использование БР на углеводородной основе стоит исключить из технологического процесса строительства нефтяных и газовых скважин из-за их пожаро- и взрывоопасности и токсичности для компонентов окружающей природной среды.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- Балаба В.И. Экологическая безопасность технологического процесса промывки скважин / В.И. Балаба // Бурение и нефть. – 2004. – №3. – С. 36-38.
- Баракхнина В.Б. Биостойкость некоторых буровых добавок на основе КМЦ и полиакриламида / В.Б. Баракхнина, Г.Г. Ягафарова, Е.Г. Ильина // Сборник научных трудов Международной научно-технической конференции «Повышение качества строительства скважин», посвященная памяти профессора Мавлютова М.Р. – Уфа: Монография, 2005. – С. 223-226.
- Баракхнина В.Б. Изучение биостойкости буровых реагентов на основе производных целлюлозы / В.Б. Баракхнина, Г.Г. Ягафарова, А.В. Чибирева, Д.В. Рахматуллин // Нефтегазовое дело – Т. 5. – №2. – 2007. – С. 151-154.
- Баракхнина В.Б. Оценка биостойкости полимерных буровых химических реагентов компании Varoid Limited / В.Б. Баракхнина, Г.Г. Ягафарова, Д.В. Рахматуллин // Башкирский химический журнал. – Т. 14. – №5. – 2007. – С. 51-53.
- Баракхнина В.Б. Сравнительная характеристика технологий переработки нефтесодержащих отходов бурения / В.Б. Баракхнина, Т.А. Исаев, И.Р. Киреев, Г.А. Рустембекова, Р.С. Сарманасев. // Наука и образование Южного Казахстана, №3(82), 2010. – С. 66-71.
- Басарыгин Ю.М. Бурение нефтяных и газовых скважин / Ю.М. Басарыгин, А.И. Булатов, Ю.М. Проселков. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002. – 632 с.
- Безносиков А.А. Развитие исследований и промышленных работ по использованию региональных сырьевых ресурсов, производств и отходов для строительства скважин (на примере Тимано-Печерской провинции). Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Ухта, 2002. – 24 с.
- Безродный Ю.Г. Проблемы удаления отходов бурения скважин на Северном Каспии в свете природоохранительного законодательства России / Ю.Г. Безродный, А.А. Курапов, С.К. Монахов // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2005. – №7. – С. 27-31.
- Бродский А. Буровые растворы на углеводородной основе. / А. Бродский, А. Файнштейн // Бурение и нефть. – 2006. – №8. – С. 24.
- Гарипов Р.Ф., Баракхнина В.Б., Шарафутдинова Г.М. Анализ рисков на основе результатов оценки культуры

безопасности. Безопасность труда в промышленности, – 2019. – №9. – С. 82-87.

11. Еникеева Т.М., Киреев И. Р., Барахнина В.Б. Физиология трудовой деятельности / УГНТУ, каф. ПБиОТ ; сост.: Т. М. Еникеева, И. Р. Киреев, В. Б. Барахнина. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2012. – 167 с.

12. Любимов В.С. Создание комплексных реагентов многофункционального назначения с целью повышения эффективности буровых работ в условиях Крайнего Севера. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Краснодар, 2002. – 24 с.

13. Матыцин В.И. Концепция природоохранных мероприятий при бурении скважин /В.И. Матыцин // Бурение и нефть. – 2006. – №9. – С. 36-38.

14. Тагирова К.Б., Барахнина В.Б., Киреев И.Р., Коннов Я.А. Выявление возможного негативного воздействия бурового реагента «Брусит» на работников, задействованных в строительстве скважин. Безопасность труда в промышленности. – 2021. – №9. – С. 75-80.

15. Федосов А.В., Идрисова К.Р., Абдрахманов Н.Х., Муратова Р.Р., Валекжанин Д.Ю., Кулаков П.А. Промышленная безопасность при производстве буровых работ: учебное пособие. – Стерлитамак; Уфа: Вектор науки, 2020, – 149 с.

16. Федосов А.В., Барахнина В.Б. Учебно-методическое пособие для проведения практических работ по дисциплине «Управление рисками, системный анализ и моделирование». – Уфа: УГНТУ. 2016. – С. 48 с.

17. Хасанов И.Ю. Проблемы экологической безопасности при добыче и транспорте нефти и пути их решения /И.Ю. Хасанов, Г.Х. Габитов, Н.С. Волочков и др. //Нефтяное хозяйство. – 2003. – №3. – С.112.

18. Четвертнева И.А. Разработка многофункциональных добавок для повышения эффективности бурения и заканчивания скважин. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Уфа, 2003. – 23 с.

19. Шарафиев Р.Г., Ерофеев В.В., Киреев И.Р., Абдрахимов Ю.Р., Барахнина В.Б. Геоэкология и безопасность в техносфере /под. ред. Р.Г. Шарафиева и В.В. Ерофеева. Челябинск, Уфа: ЦНТИ, 2010. – 348 с.

20. Шарафиев Р.Г., Киреев И.Р., Ерофеев В.В., Барахнина В.Б. Энциклопедия безопасности жизнедеятельности / Р.Г. Шарафиев, В.Б. Барахнина, И.Р. Киреев, В.В. Ерофеев. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2016. – 719 с.

21. Barachnina V.B., Kyismatullina D.D. The immobilization of alkane-trophic microorganisms on organic carriers for remediation of the oily ground. European journal of natural history. – 2009. – N2. – PP. 55.

22. Barachnina V.B., Yagafarova G.G., Ilina E.G., Yagafarov I.R. Results of biostability testing of some polymeric additives in the drilling water. Intellectual service for Oil and Gas Industry: analysis, solutions, perspectives. 4th Volume, Miskolk University, 2006. – PP. 193-196.

23. Gray J.S., Clarke K.R., Warwik R.M., Hobbs C. Detection of initial effects of pollution on marine benthos: an example from Ekofisk and Eldfisk oilfields. North Sea // Mar. Ecol. Progr. Ser. – 1990. – N3. – PP. 285-299.

24. Moiseychenko G.V. The influence of pollutions on sea while praspsecting and developing (Exploitation) oil and gas depositis // Third Annual Meeting (PICES). 1994, – PP. 23-25.

*Статья поступила в редакцию 30.08.2022*

*Статья принята к публикации 16.09.2022*

УДК 621.31

DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0031

**ВЕРОЯТНОСТНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭНЕРГИИ ЭМП  
НА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ ПЕРСОНАЛ**

© Автор(ы) 2022

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.** Целью статьи является разработка вероятностного метода оценки воздействия энергии ЭМП на электротехнический персонал. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: 1. Определить какие вредные производственные факторы воздействуют на электротехнический персонал. 2. Исследовать энергетические параметры ЭМП, воздействующие на персонал: среднесменную энергетическую нагрузку, дозу потенциальной энергии облучения и удельную суточную дозу поглощенной энергии ЭМП. 3. Построить модель событий вредного воздействия энергии ЭМП на электротехнический персонал. В связи с отсутствием методов вероятностной оценки воздействия параметров электромагнитных полей (ЭМП) на персонал, в статье предложен метод логико-вероятностного моделирования, позволяющий оценить условную вероятность вредного воздействия на персонал: среднесменной энергетической нагрузки, дозы потенциальной энергии облучения и удельных суточных доз поглощенной энергии ЭМП. Для описания случайных процессов, связанных с воздействием на электротехнический персонал параметров ЭМП применен метод логико-вероятностного моделирования. Математическая сущность моделирования заключается в использовании функций алгебры логики для аналитической записи вредного воздействия параметров ЭМП на персонал и в разработке способов перехода от функций алгебры логики к вероятностным функциям, объективно отражающим степень вредного влияния. Используя имеющиеся данные, оценена условная вероятность возникновения заболеваний персонала от ЭМП. Определен возможный сценарий развития событий при воздействии на персонал параметров ЭМП: среднесменной энергетической нагрузки, дозы потенциальной энергии облучения и удельной суточной дозы поглощенной энергии ЭМП. Логико-вероятностная модель позволила определить не только степень возможного появления на рабочих местах параметров ЭМП, но и условную вероятность их вредного воздействия на персонал, что ранее не осуществлялось. В статье представлено новое решение актуальной задачи охраны труда по разработке вероятностного метода оценки воздействия энергии ЭМП на электротехнический персонал. Приведенная модель может использоваться при комплексной оценке системы управления охраной труда на железнодорожном транспорте.

**Ключевые слова:** электрическое поле, магнитное поле, вероятность, энергия ЭМП, вредный производственный фактор, логико-вероятностная модель.

**PROBABILISTIC METHOD FOR ASSESSING THE IMPACT OF EMF ENERGY  
FOR ELECTRICAL ENGINEERING PERSONNEL**

© The Author(s) 2022

**ZAKIROVA Alfiya Rezavanovna**, candidate of technical sciences,  
associate professor of the Department «Technospheric safety»*Ural state university of railway transport**(620034, Yekaterinburg, Russia., Kolmogorova str., 66 e-mail: AZakirova@usurt.ru)*

**Abstract.** The purpose of the article is to develop a probabilistic method for assessing the impact of EMF energy on electrical personnel. To achieve this goal, it is necessary to solve the following tasks: 1. Determine which harmful production factors affect electrical personnel. 2. To investigate the EMF energy parameters affecting personnel: the average shift energy load, the dose of potential irradiation energy and the specific daily dose of absorbed EMF energy. 3. To build a model of events of harmful effects of EMF energy on electrical personnel. Due to the lack of methods for probabilistic assessment of the impact of electromagnetic field parameters (EMF) on personnel, the article proposes a method of logical-probabilistic modeling that allows to estimate the conditional probability of harmful effects on personnel: the average energy load, the dose of potential irradiation energy and specific daily doses of absorbed EMF energy. The method of logical-probabilistic modeling is used to describe random processes associated with the impact of EMF parameters on electrical personnel. The mathematical essence of modeling is the use of logic algebra functions to analytically record the harmful effects of EMF parameters on personnel and to develop ways to transition from logic algebra functions to probabilistic functions that objectively reflect the degree of harmful influence. Using the available data, the conditional probability of the occurrence of staff diseases from EMF is estimated. A possible scenario for the

development of events when EMF parameters are exposed to personnel: the average energy load, the dose of potential irradiation energy and the specific daily dose of absorbed EMF energy. The logical-probabilistic model allowed us to determine not only the degree of possible appearance of EMF parameters in the workplace, but also the conditional probability of their harmful effects on personnel, which was not previously carried out. The article presents a new solution to the urgent task of labor protection on the development of a probabilistic method for assessing the impact of EMF energy on electrical personnel. The above model can be used for a comprehensive assessment of the occupational safety management system in railway transport.

**Keywords:** electric field, magnetic field, probability, EMF energy, harmful production factor, logical-probabilistic model.

*Для цитирования:* Закирова А.П. Вероятностный метод оценки воздействия энергии ЭМП на электротехнический персонал / А.П. Закирова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022. – Т. 11. – № 3(59). – С. 199-203. – DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0031.

**Введение.** Для электротехнического персонала, обслуживающего электроподвижной состав, вредными факторами производственной среды являются: освещенность, микроклимат, шум, электромагнитные поля (ЭМП) [1-4]. Исследование профессиональных рисков [5-12] и вероятности вредного воздействия на персонал производственных факторов – в настоящее время актуально. В законодательстве охраны труда произошли большие изменения, теперь в системе управления охраной труда работодателям необходимо использовать риск-ориентированный подход [13-16]. Актуальность тематики исследования по оценке рисков на железнодорожном транспорте также подтверждается публикациями [17–18], а исследование вероятности вредного воздействия [19-20].

**Методология.** Электрооборудование, создающее в электроподвижном составе электрические и магнитные поля, является источником перечисленных параметров. В статье предложен метод логико-веро-

ятностного моделирования (ЛВМ): среднесменной энергетической нагрузки, дозы потенциальной энергии облучения и удельных суточных доз поглощенной энергии ЭМП. Эти параметры существенно изменяются в зависимости от:

- величины тока (частоты, переменного) и напряжения электроустановок;
- индивидуальных параметров человека (масса и площадь тела человека);
- эффективности используемых организационно-технических средств, при превышении предельно безопасных уровней (ПБУ) среднесменной энергетической нагрузки ЭМП.

Предельно безопасные уровни – уровни энергетических характеристик ЭМП, превышение которых приведет к риску нарушения здоровья персонала, связанного с обслуживанием электроустановок.

На рисунке 1 приведена ЛВМ, из элементов, соответствующих событиям ( $X_1-X_{11}$ ).

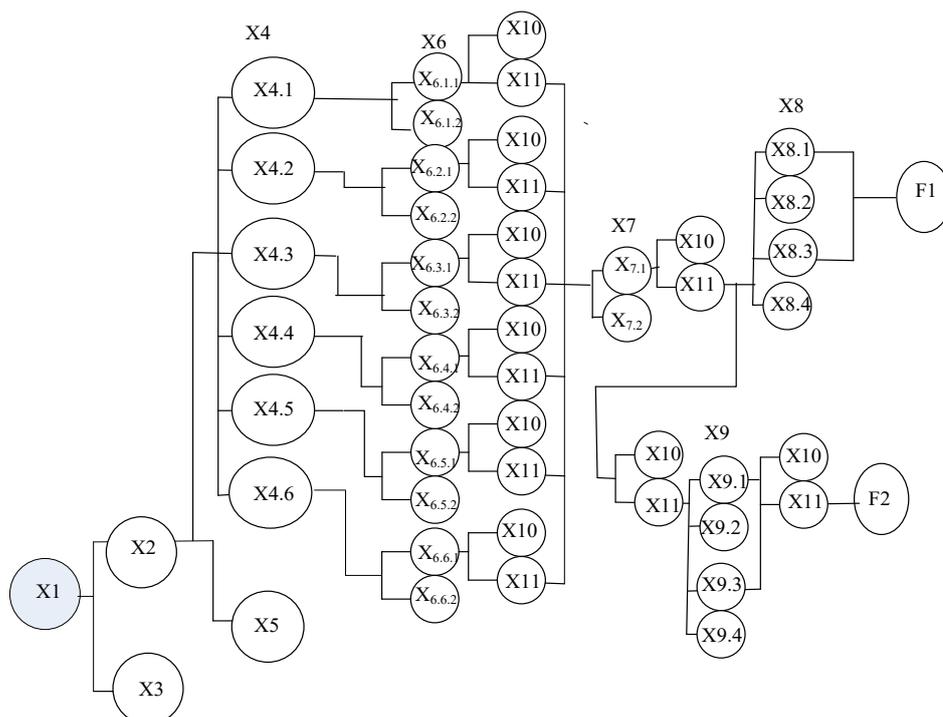


Рисунок 1 – Логико-вероятностная модель оценки неблагоприятного воздействия параметров ЭМП на электротехнический персонал

Рассматриваемая техническая система включает способы, устройства, приспособления, предохраняющие персонал от вредных производственных факторов – элементы защиты. На рисунке 1 представлены: верхние и нижние ветви дерева событий, соответствующие  $X_3; X_5; X_{6.1.2}; X_{6.2.2}; X_{6.3.2}; X_{6.4.2}; X_{6.5.2}; X_{6.6.2}; X_{7.2}; X_{8.2}; X_{8.4}; X_{9.2}; X_{9.4}; X_{10}$  и  $(X_2; X_4; X_{6.1.1}; X_{6.2.1}; X_{6.3.1}; X_{6.4.1}; X_{6.5.1}; X_{6.6.1}; X_{7.1}; X_{8.1}; X_{8.3}; X_{9.1}; X_{9.3}; X_{11})$ .

Ветви дерева событий отражают возможное развитие событий, связанных с воздействием на персонал энергетических параметров ЭМП.

ЛВМ содержит:

- продолжительность экспозиции параметров ЭМП;
- расстояние от источника ЭМП до электротехнического персонала, обслуживающего ЭПС,
- Несовместные события –  $X_2$  и  $X_3; X_4$  и  $X_5; X_{10}$  и  $X_{11}$ , так как появление одного из них исключает появление другого, а  $X_4, X_6$  и  $X_7$  – эквивалентные.
- В таблице 1 приведены элементы ЛВМ условной вероятности вредного воздействия на персонал, находящегося в кабине электроподвижного состава.

Таблица 1 – Элементы логико-вероятностной модели

Группа событий	Обозначение событий	Содержание
События, связанные с эксплуатацией электроустановок	$X_1$	Эксплуатация и обслуживание оборудования, расположенного на ЭПС:
	$X_2, X_3$	работа электрооборудования на переменном токе свыше 50 А до 50 А.
	$X_4 (X_{4.1} \dots X_{4.6})$	Наличие в токе спектра высших гармонических составляющих.
	$X_5$	ЭУ работает на постоянном токе.
События, связанные с воздействием на персонал параметров ЭМП	$X_6$	Воздействие на персонал $\mathcal{E}(f)$ :
	$X_{6.1.1} \dots X_{6.6.2}$	наблюдается превышение ПБУ или не наблюдается.
	$X_7$	Влияние на персонал $\Sigma \mathcal{E}(f)$ :
	$X_{7.1} - X_{7.2}$	наблюдается превышение ПБУ или не наблюдается.
	$X_8$	Персонал подвергается воздействию $D_{co}(f)$ :
	$X_{8.1} - X_{8.2}$	уровни $D_{co}(f)$ превышают ПБУ ( $S$ до 1,73 м <sup>2</sup> ) или не превышают.
	$X_{8.3} - X_{8.4}$	уровни $D_{co}(f)$ превышают ПБУ ( $S$ более 1,73 м <sup>2</sup> ) или не превышают.
	$X_9$	На персонал воздействуют $D_{cp}(f)$ :
	$X_{9.1} - X_{9.2}$	уровни $D_{cp}(f)$ превышают ПБУ ( $m$ до 70 кг) или не превышают.
	$X_{9.3} - X_{9.4}$	уровни $D_{cp}(f)$ превышают ПБУ (при $m$ свыше 70 кг) или не превышают.
$X_{10} \dots X_{11}$	Использование электротехническим персоналом устройств для оценки и контроля энергетических параметров ЭМП или неиспользование.	
Конечное событие	$F_1, F_2$	Вредное влияние энергетических параметров ЭМП на электротехнический персонал, обслуживающий ЭПС.

\*  $\mathcal{E}(f)$  – энергетическая нагрузка ЭМП со спектром высших гармонических составляющих,  $\Sigma \mathcal{E}(f)$  – аддитивная (суммарная) энергетическая нагрузка,  $D_{co}(f)$  – дозы потенциальной энергии облучения,  $D_{cp}(f)$  – удельные суточные дозы поглощенной энергии ЭМП.

**Результаты.** Соответственно, условная вероятность вредного воздействия на персонал дозы потенциальной энергии облучения ЭМП определяется:

$$P(F_{1.1}) = P_{x1} \vee p_2 \vee (p_{4.1} \wedge p_{4.2} \wedge p_{4.3} \wedge p_{4.4} \wedge p_{4.5} \wedge p_{4.6}) \vee (p_{6.1.1} \wedge p_{6.2.1} \wedge p_{6.3.1} \wedge p_{6.4.1} \wedge p_{6.5.1} \wedge p_{6.6.1}) \wedge p_{11} \vee (p_{7.1} \wedge p_{11}) \vee (p_{9.1} \wedge p_{11}) \tag{1}$$

$$\text{Условная вероятность вредного влияния на персонал удельных суточных доз поглощенной энергии:}$$

$$P(F_{2.1}) = P_{x1} \vee p_2 \vee (p_{4.1} \wedge p_{4.2} \wedge p_{4.3} \wedge p_{4.4} \wedge p_{4.5} \wedge p_{4.6}) \vee (p_{6.1.1} \wedge p_{6.2.1} \wedge p_{6.3.1} \wedge p_{6.4.1} \wedge p_{6.5.1} \wedge p_{6.6.1}) \wedge p_{11} \vee (p_{7.1} \wedge p_{11}) \vee (p_{9.1} \wedge p_{11}) \tag{2}$$

или

$$P(F_{2.2}) = P_{x1} \cdot (1 - (1 - p_2)) + (1 - [1 - (1 - p_{4.1} \cdot p_{4.2} \cdot p_{4.3} \cdot p_{4.4} \cdot p_{4.5} \cdot p_{4.6}) + (1 - (1 - p_{6.1.1} \cdot p_{6.2.1} \cdot p_{6.3.1} \cdot p_{6.4.1} \cdot p_{6.5.1} \cdot p_{6.6.1}) \cdot p_{11})] + 1 - [1 - (1 - p_{7.1} \cdot p_{11}) + (1 - (1 - p_{9.1} \cdot p_{11})])]$$

При превышении ПБУ параметров ЭМП у персонала возникает условная вероятность заболевания  $P(F_{1.1})$  и  $P(F_{2.2})$ , которая зависит как от специфики работы электротехнического персонала, так и его индивидуальных физиологических параметров. Проанализировав карты специальной оценки условий труда по фактору «неионизирующие электромагнитные поля», для которого в России установлены четыре класса условий труда: с класса 2 (допустимый) до 3.3 (вредный), можно определить есть превышение ПДУ (предельно допустимых уровней) или нет. А как определить условные вероятности:  $p_6, p_8$  и  $p_9$

– не известно, поэтому были проведены экспериментальные исследования на биологических объектах. На специально разработанной экспериментальной установке (получен патент, авторы : д.т.н., профессор Кузнецов К.Б., к.т.н.. доцент Закирова А.Р.) создавались необходимые уровни энергетической нагрузки ЭМП. Биологами ИнГУ в том числе, д.б.н., профессором Плиевой А.М., наблюдались изменения роста стволовых клеток биологических объектов. Проведя анализ полученных результатов, д.т.н., профессором Кузнецовым К.Б., к.т.н.. доцентом Закировой А.Р с помощью математического аппарата теории нечетких

множеств определены численные значения условной вероятности возникновения заболеваний у персонала от вредного действия дозы потенциальной энергии облучения ЭМП:

$$P(x) = a + b \ln(D_{\infty} t),$$
$$P(x_g) = 0,12 + 0,23 \ln(D_{\infty} t), \quad (3)$$

где  $D_{\infty}$  – уровни дозы потенциальной энергии облучения ЭМП, ВА·ч;  $t$  – длительность экспозиции, ч;  $a, b$  – коэффициенты в уравнении, равные 0,12 и 0,23.

В соответствии с (3) условная вероятность заболевших людей (персонала) от действия дозы потенциальной энергии облучения ЭМП (198 кВА·ч) в зависимости от длительности экспозиции составляет за 1 сутки – 1,9%, месяц – 18%, год – 36% или с применением метода линейной интерполяции 0,02; 0,18 и 0,36..

Условная вероятность ухудшения состояния здоровья персонала от вредного влияния удельных суточных доз поглощенной энергии ЭМП описывается уравнением:

$$P(x_g) = 0,30 + 0,35 \ln(D_{\text{ст}} t), \quad (4)$$

где  $D_{\text{ст}}$  – уровни удельных суточных доз поглощенной энергии, ВА·ч;  $t$  – длительность экспозиции, ч;  $a, b$  – коэффициенты в уравнении, равные 0,3 и 0,35.

При действии на человека удельных суточных доз поглощенной энергии ЭМП в 2,83 кВА·ч/кг условная вероятность за сутки составит 2,5%, месяц – 45%, год – 77% или соответственно 0,03; 0,45 и 0,77.

Внедрение организационно-технических мероприятий будет способствовать снижению параметров ЭМП до допустимого уровня.

**Обсуждение.** В 2021 г. вступили в силу новые правила по охране труда, которые заменили более сотни действовавших ранее нормативных документов. Появились обязанности у работодателей по расчету профессиональных рисков с выявлением опасностей и их контролем. Многие ученые в настоящее время занимаются решением проблем, связанных с разработкой новых методов и методик оценки рисков, вероятности возникновения заболеваемости персонала от вредных производственных факторов. Результаты полученных исследований способствуют развитию методологии определения вероятности возникновения заболеваемости электротехнического персонала от воздействия электромагнитных полей.

Проведенные исследования показали необходимость оценивать на рабочих местах электротехнического персонала, не только электрическую и магнитную составляющую ЭМП, а так же энергетическую нагрузку ЭМП, что согласуется с результатами исследований Шимони К., руководителя кафедры теоретической электротехники Будапештского технического университета, основанных на корректном применении методов математического моделирования в теории электромагнитных полей. Необходимость оценки дозы потенциальной энергии облучения ЭМП и удельных суточных доз поглощенной энергии ЭМП подтверждается работами д.т.н., профессора Кузнецова К.Б. (УрГУПС).

Используя ЛВМ можно определить условную вероятность вредного действия параметров ЭМП, при необходимости ее снизить, своевременно разработав организационно-технические мероприятия, и тем самым предупредить профессиональную заболеваемость электротехнического персонала.

**Заключение.** Исследование показало, что имеется логарифмическая зависимость условной вероятности возникновения заболеваемости персонала от энергетических параметров ЭМП.

Определено, что условная вероятность заболеваемости персонала от действия дозы потенциальной энергии облучения ЭМП (198 кВА·ч) в зависимости от длительности экспозиции изменяется от 1,9% (сутки) до 36% (год), а при действии удельных суточных доз поглощенной энергии ЭМП в 2,83 кВА·ч/кг составит 2,5% за сутки и 77% – год.

Впервые разработана логико-вероятностная модель, позволяющая оценивать энергетические параметры ЭМП относительно электротехнического персонала. Решение модели показало, что оценка условной вероятности вредного воздействия на персонал параметров ЭМП может быть описана с применением теории нечетких множеств.

Модель может использоваться в компании ОАО «РЖД» при проведении комплексной оценке системы управления охраной труда на железнодорожном транспорте. С целью предупреждения профессиональных заболеваний электротехнического персонала необходимы дальнейшие исследования вероятности вредного влияния параметров ЭМП при нахождении его в машинном отделении электроподвижного состава.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Закирова А.Р. Защита электротехнического персонала от вредного воздействия электромагнитных полей. Екатеринбург: УрГУПС. 2017. – 188 с.
2. 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.
3. Кузнецов К.Б., Закирова А.Р. Аддитивное воздействие электрических и магнитных полей на электротехнический персонал // Безопасность труда в промышленности. – 2021. – № 4. – С. 27-31.
4. Kuznetsov K., Zakirova A., Averyanov U. Specific energy of 50 Hz electromagnetic field. / 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017 – Proceedings. electronic edition. 2017. – pp. 8076222.
5. Маркеленкова Н.А. Оценка профессиональных рисков неионизирующего излучения на пониженных подстанциях. / Новые горизонты. VIII научно-практическая конференция с международным участием. Брянск. – 2021. – С. 998-1002.
6. О.Ю. Устинова, Н.В. Зайцева, Е.М. Власова, В.Г. Костарев Корпоративные программы профилактики нарушения здоровья вредных предприятий как инструмент управления профессиональным риском // Анализ риска здоровья. – 2020. – № 2. – С. 72-82.
7. Титова Е.Я., Голубь С.А. Современные проблемы охраны здоровья сотрудников крупного промышленного предприятия, работающих в условиях профессиональных вредностей // Анализ риска здоровья. – 2017. – № 4. – С. 83-90.
8. Пазуха А.А. Анализ профессиональных рисков при обслуживании и ремонте устройств контактной сети // Наука

- и техника транспорта. – 2020. – № 4. – С. 85-93.
9. Самчук-Хабарова Н.Я., Гапонов В.Л., Дудник В.В., Кузнецов Д.М. Аспекты совершенствования этапов управления рисками. // Качество и жизнь. – 2020. – № 2 (26). – С. 14-18.
10. А.В. Федосов, Н.Х. Абдрахманов, А.С. Гусева, Р.Р. Ахметьянов. Возможность применения результатов неразрушающего контроля для оценки профессиональных рисков в системе управления охраной труда// Безопасность техногенных и при-родных систем 2022. – № 1. – С. 4-8.
11. Стрилевская М.А. Анализ системы управления охраны труда (СУОТ) на транспорте / Современное состояние, проблемы и перспективы развития отраслевой науки. – 2016. – С. 403-408.
12. Макаров П. В. Профессиональные риски / Нижегород. гос. архитектур. - строит. ун-т – Н. Новгород: ННГАСУ, 2018. – 144 с.
13. Nikulin A., Nikulina A.Y. 2017. Assessment of occupational health and safety effectiveness at a mining company. Ecology, Environment and Conservation, 23(1). – pp. 351-355.
14. Sabrina Letícia Couto da Silvaa. Critical factors of success and barriers to the implementation of occupational health and safety management systems: A systematic review of literature/Sabrina Letícia Couto da Silvaa, Fernando Gonçalves Amarala. Safety Science. 2019, volume 117. – pp. 123-132.
15. Shalimova A.V., Filin A.E., Davydenko A.A. Analysis of evaluation results of occupational health, industrial and environmental safety management systems at enterprises of mining and smelting complex. Topical Issues of Rational Use of Natural Resources 2019. – 2020. – 1. – pp. 100-105.
16. Korshunov G.I., Rudakov M.L., Kabanov E.I. The use of a risk-based approach in safety issues of coal mines / Journal of Environmental Management and Tourism, 9(1), 2018. – pp. 181-186.
17. Gintautas Bureika, Eduardas Gaidamauskas, Jonas Kupinas, Marijonas Bogdevicius, Stasys Steišūnas. Modelling the Assessment of Traffic Risk at Level Crossings of Lithuanian Railways. Transport. 2017. Vol. 32(3). Vilnius Gediminas Technical University. – pp. 282-290
18. Bohus Leitner. A General Model for Railway Systems Risk Assessment with the Use of Railway Accident Scenarios Analysis. 10th International Scientific Conference Transbaltica 2017: Transportation Science and Technology. ScienceDirect. Procedia Engineering 187. 2017. pp. 150-159
19. Yan Fang, M.A.K. Rasel, Peyton C. Richmond. Consequence risk analysis using operating procedure event trees and dynamic simulation. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. Volume 67. September 2020. – pp 104235.
20. Cesar Qeral, Kevin Fernández-Cosials, Jose Posada. Application of Expanded. Reliability Engineering & System Safety. Volume 205. January 2021. – pp. 107246.

*Статья поступила в редакцию 27.06.2022*

*Статья принята к публикации 16.09.2022*

УДК 699.85

DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0032

## К ЗАДАЧЕ ФОРМИРОВАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО ИНДЕКСА БЕЗОПАСНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

© Автор(ы) 2022

SPIN: 1725-3269

AuthorID: 746605

**ВОСКОБОЕВ Виктор Федорович**, доктор технических наук, профессор,  
старший научный сотрудник научно-исследовательского центра

*Академии гражданской защиты МЧС России*

*(141435, Московская область, г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А, e-mail: v.voskoboev@amchs.ru)*

SPIN: 8654-3788

AuthorID: 709088

ORCID: 0000-0002-4037-1231

ResearcherID: O-9318-2017

ScopusID: 56979008100

**РЫБАКОВ Анатолий Валерьевич**, доктор технических наук, профессор,

начальник научно-исследовательского центра

*Академии гражданской защиты МЧС России*

*(141435, Московская область, г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А, e-mail: a.rybakov@amchs.ru)*

SPIN: 5470-1533

AuthorID: 888327

ORCID: 0000-0002-9093-1559

ScopusID: 57209274032

**ИВАНОВ Евгений Вячеславович**, кандидат технических наук

начальник научно-исследовательского отдела по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций

*Академии гражданской защиты МЧС России*

*(141435, Московская область, г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А, e-mail: e.ivanov@amchs.ru)*

SPIN: 8853-6469

AuthorID: 1033228

ORCID: 0000-0002-9316-6928

ScopusID: 57225988688

**СОРОКИН Алексей Юрьевич**, кандидат технических наук

преподаватель кафедры информатики и вычислительной техники

*Академии гражданской защиты МЧС России*

*(141435, Московская область, г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А, e-mail: a.sorokin@amchs.ru)*

**Аннотация.** В статье предлагается к рассмотрению подход к аналитическому выражению интегрального индекса безопасности функционирования технической системы. В основе индекса лежит подход, предусматривающий комплексную зависимость его значений от некоторого, индивидуального для каждой системы, набора параметров, определяющих выполнение заданных функций системы. Найденная функциональная зависимость позволяет осуществить математическую постановку задачи по приведению значений интегрального индекса безопасности к максимуму, за счет варьирования зависимых параметров системы. Кроме того, за счет оценки влияния каждого параметра, в конечном итоге решается задача управления характеристиками технической системы. Помимо непосредственно решения оптимизационной задачи, по поиску наилучшего решения, обеспечивающего нахождение рациональных значений параметров системы, с применением рассматриваемого индекса может быть получена область допустимых значений комплексного показателя. В свою очередь, найденная область допустимых значений обеспечивает возможность предъявления требований к параметрам технической системы, соответствующий найденной области. Приводится пример оценки интегрального индекса безопасности для конкретной системы управления с заданными свойствами. На основе найденного решения приводится графическое представление области допустимых значений для безопасного функционирования системы.

**Ключевые слова:** техническая система, интегральный индекс безопасности, оценка безопасности, показатель защищенности, чрезвычайная ситуация, система управления, математическая модель, мониторинг, область допустимых значений, управляемые параметры.

## TO THE TASK OF FORMING AN INTEGRAL SAFETY INDEX OF THE FUNCTIONING OF A TECHNICAL SYSTEM

© The Author(s) 2022

**VOSKOBEOV Viktor Fedorovich**, doctor of technical sciences, professor, senior researcher at the Research Center

**RYBAKOV Anatolij Valer'evich**, doctor of technical sciences, professor, head of the research center  
**IVANOV Evgenij Vyacheslavovich**, candidate of technical sciences,  
 head of the Research Department on Civil Defense and Emergency Situations of the Research Center  
**SOROKIN Aleksej Yur'evich**, candidate of technical sciences,  
 lecturer of the Department Computer Science and Computer Engineering  
*Civil Defence Academy*

(141435, Moscow region, Khimki, md. Novogorsk, st. Sokolovskaya, building 1A,  
 e-mail: v.voskoboev@amchs.ru, a.rybakov@amchs.ru, e.ivanov@amchs.ru, a.sorokin@amchs.ru)

**Abstract.** The article proposes to consider an approach to the analytical expression of the integral safety index of the functioning of a technical system. The index is based on an approach that provides for a complex dependence of its values on some, individual for each system, set of parameters that determine the performance of the specified functions of the system. The found functional dependence makes it possible to carry out a mathematical formulation of the problem of bringing the values of the integral safety index to the maximum by varying the dependent parameters of the system. In addition, by assessing the impact of each parameter, the task of managing the characteristics of the technical system is ultimately solved. In addition to directly solving the optimization problem, in order to find the best solution that ensures finding rational values of the system parameters, using the index in question, the range of acceptable values of the complex indicator can be obtained. In turn, the found range of acceptable values provides the possibility of presenting requirements to the parameters of the technical system corresponding to the found area. An example of the evaluation of the integral safety index for a specific control system with specified properties is given. Based on the solution found, a graphical representation of the range of acceptable values for the safe operation of the system is given.

**Keywords:** technical system, integral safety index, safety assessment, security indicator, emergency situation, control system, mathematical model, monitoring, range of acceptable values, controlled parameters.

*Для цитирования:* Воскобоев В.Ф. К задаче формирования интегрального индекса безопасности функционирования технической системы / В.Ф. Воскобоев, А.В. Рыбаков, Е.В. Иванов, А.Ю. Сорокин// XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022. – Т. 11. – № 3(59). – С. 204-209. – DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0032.

**Введение.** В настоящее время большое внимание в исследованиях [1-5] уделяется обоснованию мероприятий по обеспечению защиты населения и в качестве показателя выбирается защищенность, в частности повышение уровня защищенности особо важных и потенциально опасных объектов, обеспечение их устойчивого функционирования в условиях чрезвычайных ситуаций. Эти работы направлены на оценку разных по своей природе поражающих факторов. Причем комплексные показатели защищенности или опасного состояния объектов имеют различные единицы и шкалы измерения. Именно поэтому необходимо говорить об индексе того или иного показателя (безопасности, опасности и т.д.).

Анализ большого класса технических систем (в том числе систем жизнеобеспечения, мониторинга и т.п.) или процессов [6-8] позволяет следующим образом описать ситуацию, связанной с формализацией процесса функционирования объектов.

Выходной эффект  $Y$  оценивается некоторой функцией  $f$  от комплексного показателя (далее – КП)  $\eta$ , который является комбинацией параметров  $\{v_i, g_k, i = \overline{1, I}; k = \overline{1, K}\}$ , реализующих заданные функции, т. е.

$$Y = f[\eta(v, g)]. \quad (1)$$

Вид зависимости выходного эффекта от комплексного показателя имеет три характерных участка.

На начальном участке изменения КП величина выходного эффекта изменяется с малой скоростью.

На втором участке скорость изменения выходного

эффекта существенно возрастает. На третьем участке снова наблюдается слабая зависимость изменения выходного эффекта от значения КП.

Выходной эффект может иметь различный физический смысл – величина разрушения, уровень усвоения учебного материала, количество публикаций по определённой тематике, степень соответствия требуемому уровню качества и т. п.

Так, при оценке величины разрушения первый этап соответствует ситуации, когда величина внешнего воздействия существенно меньше характеристик прочности материала. По мере уменьшения разницы между этими величинами степень разрушения возрастает (2 этап). На третьем этапе влияние внешних сил проявляется слабо, т.к. материал практически разрушен.

Другим примером является рост информационных потоков (количество публикаций), который определяется уровнем развития науки по данному направлению [9].

При анализе поведения таких процессов часто используется математическая модель вида

$$\frac{dY}{dt} = c \cdot Y(b - Y), c > 0. \quad (2)$$

Решением уравнения (2) является логистическая кривая

$$Y = \frac{b}{1 + a \cdot \exp(-c b t)}, b > 0, \quad (3)$$

где  $b$  – максимальное значение  $Y$ ;

$a, c$  – некоторые константы.

К похожим результатам в смысле вида зависимости выходного эффекта от КП приводит использование

функции желательности Харрингтона [7]

$$Y = \exp[-\exp(-\eta)], \quad (4)$$

где  $\eta$  – значение комплексного показателя.

Очевидно, что для технических систем и(или) процессов аргумент (параметр  $\eta$ ) по физическому смыслу является неотрицательной величиной.

Однако, для логистической кривой аргумент изменяется в интервале  $(-\infty, +\infty)$ , для функции Харрингтона – в диапазоне  $[0, 1]$ .

Отсюда следует, что диапазон изменения аргумента как в логистической кривой, так и для функции Харрингтона с точки зрения физического смысла не может быть использован без дополнительных условий и ограничений на выбор используемого участка.

Подобные ограничения либо существенно снижают эффективность использования таких функций, либо могут привести к ошибочным выводам.

Одной из существенных реализаций выходного эффекта при функционировании технической системы является её безопасность. Количественно показатель безопасности может представлять собой абсолютные, относительные характеристики, имеющие смысл вероятности, времени, удельных соотношений и т. п.

В ряде практических случаев целесообразно иметь интегральную оценку уровня безопасности функционирования технической системы – интегральный индекс безопасности.

Подобная оценка необходима, с одной стороны, для оценки уровня безопасности, а с другой – для выделения системы, уровень безопасности которой либо не соответствует требованиям, либо, при сравнении с другими системами, является наименьшим. Задача сравнения и последующего выбора наиболее опасной системы связана с тем, что ограничены возможные средства для обеспечения безопасности.

Целью настоящей статьи является получение аналитического соотношения, связывающего комплексный показатель с оценкой интегрального индекса безопасности функционирования технической системы. При этом должны выполняться следующие условия:

– механизм изменения выходного эффекта от комплексного показателя описывается зависимостью экспоненциального вида;

– интегральный индекс изменяется в диапазоне  $[0, 1]$  и зависит от всех частных характеристик, по которым предъявляются требования к технической системе;

– областью определения аргументов  $\vartheta, g$  в (1) является интервал  $[0, 1]$ .

**Методология.** Рассмотрим систему, для которой индекс безопасности функционирования описывается функцией  $\Phi_{\Sigma}(S)$ , зависящей от множества параметров  $S$ .

В общем случае в этом множестве существуют параметры двух типов. Обозначим соответствующие множества  $F$  и  $G$ , при этом  $S = F \cup G; F \cap G = \emptyset$ .

Параметры множества  $F = \{\vartheta_i, i = \overline{1, I}\}$  характери-

зуются тем, что с ростом любого из них функция  $\Phi_{\Sigma}(S)$  возрастает, т.е. для элементов этого множества имеем

$$\frac{\partial \Phi_{\Sigma}(S)}{\partial \vartheta_i} > 0, i = \overline{1, I}. \quad (5)$$

Для другого типа параметров, составляющих множество  $G = \{g_k, k = \overline{1, K}\}$ , имеет место другая картина – индекс безопасности  $\Phi_{\Sigma}(S)$  возрастает при убывании таких параметров, т.е.

$$\frac{\partial \Phi_{\Sigma}(S)}{\partial g_k} < 0, k = \overline{1, K}. \quad (6)$$

Если считать результат воздействия параметров этих двух множеств независимым, а параметры действуют одновременно, то результирующий индекс безопасности

$$\Phi_{\Sigma}(S) = \Phi_{+}(\vartheta_i, i = \overline{1, I}) \cdot \Phi_{-}(g_k, k = \overline{1, K}). \quad (7)$$

где  $\Phi_{+}(\vartheta_i, i = \overline{1, I}), \Phi_{-}(g_k, k = \overline{1, K})$  – результат влияния на индекс безопасности параметров, удовлетворяющих условиям (5) и (6) соответственно.

Наложим на функцию  $\Phi_{\Sigma}(S)$  условие

$$0 \leq \Phi_{\Sigma}(S) \leq 1. \quad (8)$$

Будем также считать, что для элементов  $\vartheta, g_k$  выполняются условия:

$$0 \leq \vartheta_i \leq 1, i = \overline{1, I}; \quad (9)$$

$$0 \leq g_k \leq 1, k = \overline{1, K}. \quad (10)$$

Каждая функция  $\Phi_{+}(\cdot)$  и  $\Phi_{-}(\cdot)$  описывается выражением вида

$$\Phi(s) = \exp[-\exp(-s)], \quad (11)$$

где  $s = \vartheta(\vartheta_i, i = \overline{1, I})$  для  $\Phi_{+}(\cdot)$ ; (12)

$s = g(g_k, k = \overline{1, K})$  для  $\Phi_{-}(\cdot)$ . (13)

Определим значения комплексных показателей  $\vartheta$  и  $g$  в (12) и (13) следующим образом:

$$\vartheta = \sqrt[I]{\prod_{i=1}^I \vartheta_i}, \quad (14)$$

$$g = \sqrt[K]{\prod_{k=1}^K g_k}. \quad (15)$$

Необходимо определить аналитическое выражение для функции  $\Phi_{\Sigma}(S)$  при условиях (8), (9), (10), (14), (15).

Определим последовательно выражения для  $\Phi_{+}(\cdot)$  и  $\Phi_{-}(\cdot)$ .

Очевидно, что условие (8) с учётом (9), (10) влечёт необходимость удовлетворения функциями  $\Phi_{+}(\cdot)$  и  $\Phi_{-}(\cdot)$  условиям:

$$0 \leq \Phi_{+}(\cdot) \leq 1; \quad (16)$$

$$0 \leq \Phi_{-}(\cdot) \leq 1. \quad (17)$$

Для определения этих функций воспользуемся граничными условиями, вытекающими из (16) и (17).

Для функции  $\Phi_{+}(\cdot)$  из (11) имеем при  $\vartheta=0$

$$\Phi_{+}(0) = \exp[-\exp(-0)] = \exp(-1). \quad (18)$$

Для удовлетворения условию  $\Phi_{\Sigma}(0) = 0$  при  $\vartheta=0$  вычтем из (11) полученное значение (18). В этом случае при  $\vartheta=0$  для нормированного значения  $\hat{\Phi}_{+}(\cdot)$  получаем

$$\hat{\Phi}_{+}(0) = \exp\{-\exp(-0)\} - \exp(-1) = 0. \quad (19)$$

Для удовлетворения условию  $\hat{\Phi}_+(1) = 1$  необходимо, чтобы

$$\hat{\Phi}_+(\vartheta) = [\exp\{-\exp(-\vartheta)\}] - \exp(-1) \cdot \Delta = 1, \quad (20)$$

откуда

$$\Delta = \frac{1}{\exp[-\exp(-\vartheta)] - \exp(-1)}. \quad (21)$$

При  $\vartheta=1$   $\Delta = \frac{1}{\exp[-\exp(-1)] - \exp(-1)}$ .

Тогда

$$\hat{\Phi}_+(\vartheta) = \frac{\{\exp[-\exp(-\vartheta)]\} - \exp(-1)}{\exp[-\exp(-1)] - \exp(-1)}. \quad (22)$$

Графически выражение (22) представлено кривой (рис. 1).

Для параметров  $g_k, k = \overline{1, K}$   $\hat{\Phi}_-(1)$  должно быть равно 0.

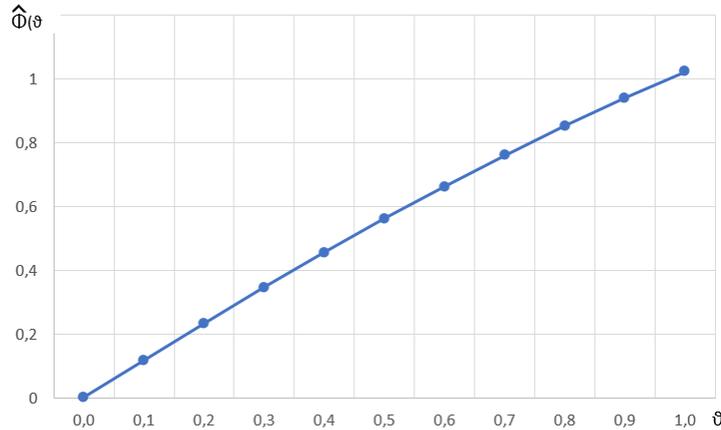


Рисунок 1 – Зависимость индекса безопасности  $\hat{\Phi}_+(\vartheta)$  от значения комплексного показателя

Так как при  $g=1$

$$\Phi_-(g) = \exp[-\exp(-1)], \quad (23)$$

то для удовлетворения условию  $\Phi_-(1) = 0$  необходимо

$$\exp[-\exp(-g)] - \exp[-\exp(-1)] \quad (24)$$

Для удовлетворению условию  $\hat{\Phi}_-(0) = 1$  необходимо

$$\hat{\Phi}_-(0) = \{[\exp(-\exp(-g))] - \exp[-\exp(-1)]\} \cdot \Delta_1 = 1 \quad (25)$$

откуда

$$\Delta_1 = \frac{1}{\exp[-\exp(-g)] - \exp[-\exp(-1)]} \quad (26)$$

При  $g=0$

$$\Delta_1 = \frac{1}{\exp[-\exp(-1)] - \exp(-1)}. \quad (27)$$

Тогда

$$\hat{\Phi}_-(g) = \frac{\exp[-\exp(-1)] - \exp[-\exp(-g)]}{\exp[-\exp(-1)] - \exp(-1)}. \quad (28)$$

Окончательно с учётом (14), (15) имеем

$$\begin{aligned} \hat{\Phi}_\Sigma(\zeta s) &= \hat{\Phi}_+(\vartheta) \cdot \hat{\Phi}_-(g) = \\ &= \frac{\{\exp[-\exp(-\sqrt[1]{\prod_{i=1}^I \vartheta_i})]\} - \exp(-1)}{\exp[-\exp(-1)] - \exp(-1)} \cdot \\ &\cdot \frac{\exp[-\exp(-1)] - \exp[-\exp(-\sqrt[k]{\prod_{k=1}^K g_k})]}{\exp[-\exp(-1)] - \exp(-1)}. \end{aligned} \quad (29)$$

Выражение (29) обеспечивает получение нормированного значения индекса безопасности при условии нормировки влияющих на него параметров, что удовлетворяет предъявляемым требованиям.

Помимо получения численного значения индекса безопасности выражение (29) позволяет определять требования к значениям комплексных показателей  $\vartheta$  и  $g$ .

Для этого необходимо решать обратную задачу:

найти такие  $\hat{\vartheta}$  и  $\hat{g}$ , при которых

$$\hat{\Phi}_\Sigma(\zeta s) = \hat{\Phi}_\Sigma(\hat{\vartheta}, \hat{g}) \geq \hat{\Phi}_{\Sigma \text{ треб}} \quad (30)$$

Решение этой задачи не является единственным, а представляет область допустимых значений  $\hat{\vartheta}$  и  $\hat{g}$  на плоскости  $\{\vartheta, g\}$ . Нижнее значение границы области соответствует условию  $\hat{\Phi}_\Sigma(\zeta s) = \hat{\Phi}_{\Sigma \text{ треб}}$ .

Относительно размеров этой области необходимо отметить, что с увеличением значения  $\hat{\Phi}_{\Sigma \text{ треб}}$  площадь области будет сокращаться. Для определения конкретных значений пары  $(\vartheta, g)$  необходимо введение дополнительных условий, например, ограничений на затраты по обеспечению значений  $\hat{\vartheta}$  и  $\hat{g}$ .

**Результаты.** Рассмотрим произвольную систему мониторинга.

Заключение системы мониторинга должно удовлетворять двум основным требованиям – своевременности и достоверности.

Первое требование обусловлено тем, что только при своевременном получении заключения системы мониторинга возможно предпринимать меры по уменьшению или предотвращению негативных последствий рассматриваемой ситуации. Особенно важным это требование представляется при предотвращении и (или) ликвидации ЧС.

Достоверность заключения связана с сокращением потерь при проведении мероприятий по предотвращению (ликвидации) ЧС. При значительной ошибке первого рода выполняются излишние работы, при ошибках второго рода дополнительные затраты связаны с ликвидацией тех последствий, которые можно было бы не допустить в случае корректного

заклЮчения системы мониторинга.

Будем характеризовать своевременность получения заклЮчения  $\vartheta_1$  вероятностью того, что время получения заклЮчения не превзойдет некоторого значения  $t_0$ , при котором возможно предупреждение последствий.

Достоверность заклЮчения  $\vartheta_2$  будем оценивать как вероятность того, что текущее значение заклЮчения соответствует истинной ситуации.

При введённых обозначениях

$$\vartheta_1 = P\{\tau \leq t_0\}, 0 \leq \vartheta_1 \leq 1, \quad (31)$$

$$\vartheta_2 = P\{s = s_0 | s_0\}, 0 \leq \vartheta_2 \leq 1, \quad (32)$$

где  $\tau$  – текущее время получения заклЮчения;

$s_0$  – истинное значение заклЮчения;

$s$  – текущее значение заклЮчения.

Очевидно, что для параметров  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$  имеем

$$\frac{\partial \Phi_{\Sigma}}{\partial \vartheta_i} > 0, i = 1, 2. \quad (33)$$

Следуя (14), введём совместную оценку указанных требований для комплексного показателя в виде

$$\vartheta = \sqrt{\vartheta_1 \cdot \vartheta_2} \quad (34)$$

Тогда с учётом (22) имеем:

$$\hat{\Phi}_{\Sigma}(\vartheta_1, \vartheta_2) \approx \frac{\{exp[-exp(-\sqrt{\vartheta_1 \cdot \vartheta_2})]\} - 0,372}{0,318}. \quad (35)$$

Выражение (35) позволяет получить значение функции  $\hat{\Phi}_{\Sigma}(\vartheta_1, \vartheta_2)$ .

Пусть  $\vartheta_1 = 0,8$ ;  $\vartheta_2 = 0,9$ .

В этом случае

$$\hat{\Phi}_{\Sigma}(\vartheta_1, \vartheta_2) \approx \frac{\{exp[-exp(-\sqrt{0,72})]\} - 0,372}{0,318} = 0,88, \quad (36)$$

что и является оценкой интегрального индекса безопасности функционирования системы мониторинга при известных значениях  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$ .

Покажем вид области допустимых решений для рассматриваемого примера.

Пусть  $\hat{\Phi}_{\Sigma \text{ треб}} = 0,9$ . В этом случае имеем

$$\frac{\{exp[-exp(-\sqrt{\vartheta_1 \cdot \vartheta_2})]\} - 0,372}{0,318} \geq 0,9, \quad (37)$$

откуда после преобразований получим

$$exp[-exp(-\sqrt{\vartheta_1 \cdot \vartheta_2})] \geq 0,604.$$

Решение этого неравенства представлено на рисунке 2.

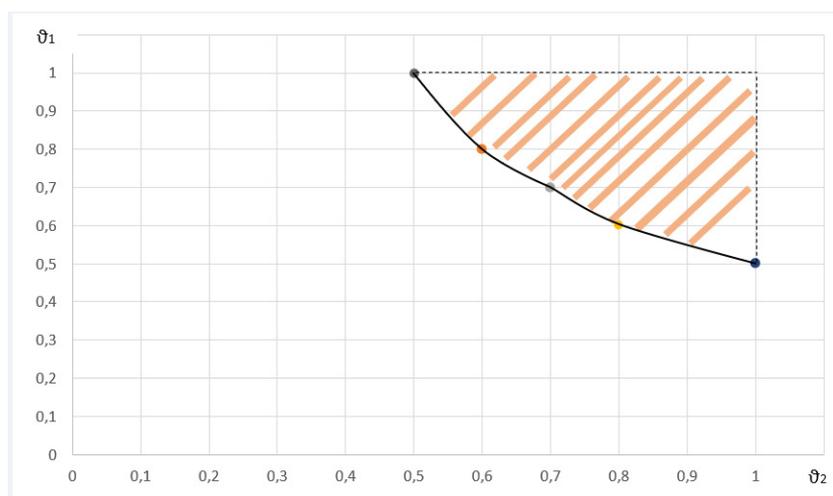


Рисунок 2 – Область допустимых значений комплексных показателей

Заштрихованная область представляет собой область допустимых значений  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$  из условия (37). Найденная область допустимых значений обеспечивает возможность предъявления требований к параметрам технической системы и может быть использована для нахождения допустимых интервалов значений технических параметров системы.

**Обсуждение.** Ранее в работах [11, 12] авторами уже рассматривалась задача повышения устойчивости функционирования сложных технических систем в условиях ограничений. Применяемый в рассматриваемых работах подход не в полной мере учитывал такую составляющую комплексного показателя, как  $\Phi_{-}(g_k, k = \overline{1, K})$ . То есть по факту предлагал решение только того класса задач, где изменяемые параметры и отклик системы имели положительную обратную связь.

В работах [13-15] предлагается переход к стохастической оценке состояния безопасности слож-

ных систем, что не всегда применимо на практике, прежде всего за счет неопределенности законов распределения случайных величин, применительно к рассматриваемым системам.

Некоторый интерес представляют работы [16-21], рассматривающие помимо собственных параметров систем еще и параметры воздействующих факторов. Рассматриваемый в статье подход в прямой постановке этого не учитывает и закладывает такую оценку в собственные параметры системы.

Следует понимать, что изменение значений безопасности функционирования технических систем осуществляется за счёт проведения работ по их модернизации при различных ограничениях. Предлагаемый авторами подход позволяет сформулировать требования к параметрам системы в виде некоего интервала допустимых значений, в области которых находятся допустимые решения для обеспечения безопасного функционирования.

**Выводы.** Полученное выражение для интегрального индекса безопасности функционирования технической системы позволяет вычислить его нормализованное числовое значение.

Способ формирования интегрального индекса безопасности даёт возможность учитывать влияние разнородных параметров, определяющих реализацию заданных функций, а также обеспечивает удовлетворение физическому смыслу таких параметров.

Решение обратной задачи позволяет получить область допустимых значений комплексных показателей, что обеспечивает возможность предъявления требований к параметрам технической системы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Rybakov A.V., Lebedeva M.V., Shmyrev V.I., Ivanov E.V. On the integrated assessment risk of the technogenic risk of accidents on the territory of a city // Journal of Emergency Management. – 2020. – Vol. 18. – № 2. – P. 105-111.
2. Slavova V.B., Dimitrova D.A., Ivanov V.A. [et al.] State policy for training the population for protective actions during disastrous situations // International Research Journal. – 2016. – No 4-5(46). – P. 122-124.
3. Овсяник А.И., Седнев В.А. Методология обоснования инженерно-технических мероприятий предупреждения чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера и оценки их эффективности // Пожаровзрывобезопасность. – 2007. – Т. 16. – № 4. – С. 53-58.
4. Строкин В.В. Планирование по защите потенциально опасных и критически важных объектов // Пробелы в российском законодательстве. – 2015. – № 5. – С. 179-181.
5. Баньщикова З.Е., Назаренко Е.К. Реализация государственной политики в области повышения защищенности критически важных и потенциально опасных объектов от угроз различного характера // Технологии гражданской безопасности. – 2019. – Т. 16. – № 1(59). – С. 54-58.
6. Гайфулин, Т.А., Костомаров Д.С. Анализ современных систем мониторинга // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2013. – № 9-2. – С. 51-55.
7. Современные системы мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций / В. Р. Болов, Э. Я. Богатырев, А. А. Быков [и др.]. МЧС России. – Москва: Центр стратегических исследований гражданской защиты МЧС России, 2013. – 351 с.
8. Глущенко В.В. Проектная модель функционирования организаций // The Scientific Heritage. – 2020. – № 53-3 (53). – С. 15-22.
9. Билятдинов К.З., Меняйло В.В. Методология оценки качества систем в сфере устойчивости больших технических объектов // Век качества. – 2020. – № 2. – С. 198-214.
10. Пичкалев А.В. Обобщенная функция желательности Харрингтона для сравнительного анализа технических средств // Исследования наукограда. – 2012. – № 1(1). – С. 25-28.
11. Воскобоев В.Ф., Рыбаков А.В., Иванов Е.В. О повышении устойчивости и безопасности опасного производственного объекта при ограниченных ресурсах // Безопасность труда в промышленности. – 2019. – № 5. – С. 47-51.
12. Воскобоев В.Ф. О выборе мероприятий по повышению устойчивости функционирования технической системы при ограниченных ресурсах // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2019. – № 1(40). – С. 13-18.
13. Юрков Н.К. Безопасность сложных технических систем // Вестник Пензенского государственного университета. – 2013. – № 1. – С. 129-135.
14. Михайлов В.С., Юрков Н.К. Интегральные оценки в теории надежности. Введение и основные результаты. Москва: Рекламно-издательский центр "Техносфера", 2020. – 152 с.
15. Klyachkin, V. & Karpunina, I. (2018). Statistical methods for assessing the stability of functioning of technical systems. Reliability & Quality of Complex Systems. 10.21685/2307-4205-

2018-2-5.

16. Вечеркин В.Б., Галанкин А.В., Прохоров М.А. Методика оценивания устойчивости функционирования автоматизированной системы управления критической информационной инфраструктурой в условиях информационного воздействия // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – № 6. – С. 160-170.

17. Флейшман Б.С. Элементы теории потенциальной эффективности систем. – М.: Сов. радио, 1971. – 224 с.

18. Ernest J. Henley, H. Kumamoto Reliability engineering and risk assessment. – Prentice-Hall, Inc, 1984. – 528 с.

19. Захарченко Р.И., Королев И.Д., Саенко И.Б. Синергетический подход к обеспечению устойчивости функционирования автоматизированных систем специального назначения // Системы управления, связи и безопасности. – 2018. – № 4. – С. 207-225.

20. Van der vleuten, Erik. (2009). Large Technical Systems. 10.1002/9781444310795.ch39.

21. Summerton, J. (ed.) (1994). Changing Large Technical Systems (Boulder, Colo.: Westview Press).

*Статья поступила в редакцию 06.08.2022*

*Статья принята к публикации 16.09.2022*

УДК 614.8.084 (078)

DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0033

## АНАЛИЗ КУЛЬТУРЫ БЕЗОПАСНОСТИ С ЦЕЛЬЮ МИНИМИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ТРАВМАТИЗМА

© Автор(ы) 2022

ORCID: 0000-0003-3014-2969

**ГОНЧАРУК Татьяна Николаевна**, старший преподаватель

*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет  
(190005, Россия, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, e-mail: tatjana.goncharuk@yandex.ru)*

**Аннотация.** В статье анализируется вопрос, каким образом осуществляется управление безопасностью и охраной труда с целью минимизации производственного травматизма. Анализ рисков несчастных случаев на предприятиях предполагает изучение сложного комплекса проблем, среди которых встречаются социальные и гигиенические характеристики условий жизни вне производства, несовершенный процесс регистрации профзаболеваний, высокий риск, непосредственно связанный с динамикой изменения вредных и опасных производственных факторов во время трудового стажа работника. Все это не позволяет сделать эффективной СУОТ и приводит к высокому риску профессиональных заболеваний. Безопасность производственной среды и ее конечный успех оказываются под большим вопросом. Сравнительный анализ российской «процедурной» модели, неэффективной в борьбе с несчастными случаями на предприятиях, с западноевропейской модели, основанной на оценке профессиональных рисков, показывает ограниченность формально-бюрократического подхода в России и перспективность национальных стандартов западных стран, позволяющих проводить оценку факторов риска для работников. Следует разрабатывать такой подход к управлению охраной труда, чтобы можно было оценку профессионального риска сделать краеугольным камнем законодательства о безопасности и охране здоровья работников.

**Ключевые слова:** культура безопасности, опасность, оценка, охрана труда и здоровья, профессиональный травматизм, риск, смертность, СОУТ, СУОТ, строительство.

## THE SAFETY CULTURE ANALYSIS TO MINIMIZE OCCUPATIONAL INJURIES

© The Author(s) 2022

**GONCHARUK Tatiana Nikolaevna**, senior lecturer

*Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering  
(190005, Russia, Saint Petersburg, Vtoraya Красноармейская street 4, e-mail: tatjana.goncharuk@yandex.ru)*

**Abstract.** In the article, the author analyzes the question of how the management of safety and labor protection is carried out in order to minimize industrial injuries. Analysis of the risks of accidents at enterprises involves the study of a complex set of problems, among which there are social and hygienic characteristics of living conditions outside of production, an imperfect process for registering occupational diseases, a high risk directly related to the dynamics of changes in harmful and dangerous production factors during the work experience of an employee, etc. All this does not allow to make an effective OHSM and inevitably leads to a high risk of occupational diseases. So, it endangers the safety of the production environment and its ultimate success. A comparative analysis of the Russian “procedural” model, which is ineffective in combating accidents at enterprises, with the Western European model based on the assessment of professional risks, shows the limitations of the formal bureaucratic approach in Russia and the prospects of the national standards of Western countries, allowing to provide an assessment of factors risk for workers. Thus, an approach to occupational health and safety management should be developed so that occupational risk assessment could be made the basis of worker safety and health legislation.

**Keywords:** safety culture, danger, assessment, labor protection and health, occupational injuries, risk, mortality, special assessment of working conditions (SAWC), occupational health and safety management (OHSM), construction.

**Для цитирования:** Гончарук Т.Н. Анализ культуры безопасности с целью минимизации производственного травматизма / Т.Н. Гончарук // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022. – Т. 11. – № 3(59). – С. 210-217. – DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0033.

**Введение.** Внедрение новшеств, а также процедуры сертификации состояния работ по охране труда, представленных в нормативных документах и ГОСТах, является, можно сказать, главным условием улучшения системы управления и охраны труда (СУОТ) в организации [1-6].

Развитие СУОТ в России далеко не однозначно [7-10]. Оно осложнено процессами, связанными с оценкой безопасности и охраны труда на предп-

риятиях. Экономические затраты, направленные на уменьшение травматизма в целом, занимают большую часть производственных расходов. Усложняя процессы расследования несчастных случаев и других происшествий, работодатель рискует крупными денежными потерями. От 2 до 3 млн руб. российский работодатель ежегодно теряет из-за неправильно выбранной стратегии по охране труда.

Потребность в объективном анализе несчастных

случаев на производстве является актуальной задачей не только для профилактики травматизма, но и повышения безопасности производственной среды, трактуемой как управление профессиональными рисками с целью охраны здоровья людей трудоспособного возраста [11]. В последние годы понятие профессионального риска было введено с переходом системы управления охраной труда и промышленной безопасностью на управление рисками. Анализ риска помогает установить уровень риска данной ситуации, обосновать и определить, является ли риск приемлемым, допустимым или неприемлемым. На этом этапе учет индивидуальных или социальных факторов становится очень важным в процессе принятия решений относительно приемлемости риска.

По мнению Деррик и Готье, если рассматривать требования техники безопасности и охраны труда, указанные факторы часто неявны и плохо определены, ибо риск – это неуверенность в отношении утраты того, что организация стремится получить, и риск основан на элементах, которые частично не поддаются контролю или не поддаются контролю вообще [12].

Д. Идрисова и соавторы предлагают выделить среди управленческих мероприятий по охране труда на предприятии нормирование производственной среды, используя оценки ежегодных приростов профессиональных рисков, характеризующих скорость накопления профессиональных рисков в течение стажа работы. Взаимосвязь между показателями «безопасный стаж работы» и «скорость накопления риска» является надежным обоснованием критерия эффективности охраны труда на предприятии. С точки зрения авторов, чтобы выйти на уровень нормативных уровней показателей вредных и опасных воздействий производственной зоны и формировать гибкую стратегию развития охраны труда, необходимо анализировать накопление профессионального риска на протяжении всего трудового стажа персонала и на его основе прогнозировать уровни рисков на различных временных этапах стажа сотрудников [13].

Вопросу о разработке методов оценки профессионального риска посвящена статья А. Усыпко и А. Ульянова [14] с опорой на «Рекомендации по выбору методов оценки уровней профессиональных рисков и по снижению уровней таких рисков» от 28.12.2021 г., утв. приказом Минтруда России. По суждению авторов, нахождение параметров для оценки профессиональных рисков является первоочередной задачей повышения безопасности работников предприятий. Например, если фактическая дозовая нагрузка соответствует контрольной величине, то условия труда согласованы с допустимым классом опасности и свидетельствуют о том, что работа, может быть, без последствий продолжена в тех же условиях. Превышение указанного уровня требует расчета стажа работы, при котором величина дозовой нагрузки не выйдет на рамки контрольного значения, и его

рекомендуется определять при среднем стаже работы 25 лет. В тех случаях, когда стаж работы составляет более 25 лет, расчет производится исходя из реального трудового стажа.

О. Суховская и В. Куликов полагают, что курение является наиболее значимым фактором риска развития хронических неинфекционных заболеваний [15]. Иначе говоря, курение, подобно хроническому перенапряжению рук, может стать причиной профессионального заболевания и привести к временной утрате трудоспособности. С точки зрения Г. Сорокина и С. Сюриня, вредные условия труда должны быть связаны не с уровнем несчастных случаев и заболеваемости, а общим состоянием здоровья персонала предприятия [16].

Авторы, анализируя производственную среду горнопромышленной отрасли, полагают, что общепринятые взгляды о вредном влиянии курения на риск возникновения болезней сердца и органов дыхания у горняков не подтверждаются. Источником хронической патологии курящих горняков являются профессиональные вредные факторы (50-60%). Остальная величина годового прироста риска по заболеваниям относится к курению (15-20%), прочим производственным вредным факторам (15-20%), эндогенным факторам биологического старения (3-5%). Таким образом почти половина заболеваний горняков приходится на непрофессиональные экологические и социальные риски.

В другой работе, изучая риски хронической усталости работников судостроения, Г. Сорокин и В. Суслов приходят к выводу о том, что их источником является нехватка отдыха в рабочее и вне рабочее время [17]. У работников отрасли распространены синдром «профессионального выгорания» и хронические нарушения сна: они вызывают как профессиональное, так и непрофессиональное нервно-психическое напряжение. Другими словами, социальная и гигиеническая характеристики условий жизни вне производства должны быть приняты во внимание при анализе рисков производственного травматизма и заболеваний.

Согласно Бауману и Скитке, необходимость безопасности и защищенности работников в процессе труда происходит из риска извлечения выгоды, имеющего фундаментальное значение в сфере социального взаимодействия между работниками и работодателями [18]. Компании, которые гарантируют, что сотрудники получают заслуженную зарплату в ходе эксплуатации труда, имеют меньше проблем с девиантным и контрпродуктивным поведением на рабочем месте, и являются более привлекательными для существующих и потенциальных сотрудников. Соответственно, на таких предприятиях низкие производственный травматизм и заболевания. Мероприятия, направленные на снижение риска эксплуатации, непосредственно приносят пользу сотрудникам и удовлетворяют их потребность в безопасности и защищенности. Медицинское

страхование работников за счет компании может достигать 85%. Политика руководства в области СУОТ заключается в том, чтобы проявлять заботу о сотрудниках, обеспечивать благоприятную производственную среду, укреплять атрибуцию корпоративной морали, поддерживать общие суждения о справедливости и укреплять доверие к компании, повышать привлекательность и заинтересованность организации и тем самым предотвращать непродуктивное поведение на рабочем месте.

В статье Н. Вадулиной и соавторов поднимается вопрос о профессиональных заболеваниях в стране при неблагоприятных факторах производства [19]. Заниженные данные о профессиональных заболеваниях, поставляемые официальной статистикой, являются следствием несовершенного процесса регистрации профзаболеваний. К этому надо прибавить незаинтересованность работодателей, работников и комиссий, проводящей медицинские осмотры, в выявлении нарушений в сфере безопасности и охраны труда, а также многочисленные недочеты законодательно-нормативной базы. Авторы приводят расчеты, согласно которым удельный вес больных с профессиональными заболеваниями составляет 7.7% от общего числа работников, прошедших обязательный медосмотр, т.е. более 60 тыс. человек страдают от профессиональных заболеваний, тогда как официальная статистика регистрирует 9-12 тыс. случаев в год. Следует принять во внимание и тот факт, что 85% работников предпочитают скрыть свои заболевания и продолжать работать в производственной среде с вредными и опасными факторами. Причина одна: стремление сохранить официально установленные льготы: надбавку, составляющую 4% от оклада в нормальных условиях труда, сокращенную рабочую неделю не более 36 часов, ежегодный дополнительный отпуск от 7 календарных дней.

Пересмотр методики специальной оценке условий труда (СОУТ) (с последующей отменой процедур аттестации рабочих мест согласно Федеральному закону от 28.12.2013 г. N 426-ФЗ «О специальной оценке условий труда»), на первый взгляд, вызвал существенное снижение нормативов по ряду производственных факторов. Как результат, прежде считавшиеся вредными и/или опасными рабочие места и условия труда были нормированы как допустимые, а удельный вес погибших в общем числе пострадавших в России увеличился с 1,9% в 1990 г. до 4,8% в 2016 г. Отношение 1 случая смерти к общему числу травм достигло величины 21:1. По данным Роструда всего погибло 2,072 тыс. человек, инвалидов – 25,5 тыс. [20]. Если придерживаться методики подсчета, принятой Международной организацией труда и достоверно отражающей ситуацию с охраной труда, реальное число пострадавших от профессиональных заболеваний в России составляет 1.0-1.2 млн работников, тогда как официальная статистика указывает на 39.781 тыс.

Авторы статьи подчеркивают: «Коэффициент общего производственного травматизма в большинстве стран Евросоюза на порядок выше, чем в России, однако по сравнению с Россией частота гибели работников на производстве в европейских странах в несколько раз ниже. Так, уровень общего производственного травматизма в северных скандинавских странах (Дания, Финляндия, Нидерланды, Швеция, Норвегия) выше, чем в России в 3-14 раз, а со смертельным исходом – ниже в 4-12 раз» [20, с. 149]. Хотя с 2015 г. доля работников, занятых на рабочих местах с санитарно-гигиеническими нарушениями, сократилась, но, как полагают эксперты, этот процесс, несомненно, стал следствием введения новых стандартов СОУТ. Снижение частоты производственных инцидентов, регистрируемых официальной статистикой на фоне крайне высокого процента предприятий с опасными и неблагоприятными условиями для труда и здоровья работников, выглядит маловероятным [21-23].

Ежедневно в результате несчастных случаев получают травмы более 960 тыс. рабочих. Каждый день 5.33 тыс. человек умирают из-за профессиональных заболеваний [24]. Поэтому на Западе инвестирование средств в профилактику несчастных случаев рассматривают как ощутимый вклад в развитие предприятия. Чтобы подобный процесс происходил в России, Т. Лукьянчикова и соавторы предлагают частично использовать средства Фонда социального страхования (ФСС), связанные с дифференциацией страховых тарифов по обязательному страхованию персонала от производственных травм и заболеваний [25]. Поскольку самый высокий размер надбавки (40%) за уплату страховых взносов предприятиями ныне получают страховщики, у которых нет заинтересованности проводить мероприятия с целью сокращения уровня производственного травматизма и заболеваний, вполне естественно было бы повысить скидки по отношению к страховым тарифам, если уровень профессионального травматизма на предприятиях минимален в соответствии с Федеральным законом 29.11.2010 г. N 326-ФЗ «Об обязательном медицинском страховании в Российской Федерации». Остается непонятным, почему ФСС устанавливает надбавки к страховым тарифам самостоятельно и в интересах страховщиков безотносительно к тому, снижается ли доля рабочих мест, не отвечающих санитарным и гигиеническим нормам. В итоге, модернизации производства на предприятиях должного внимания не уделяется, и работников подобная ситуация устраивает. В противном случае совершенствование условий труда привело бы к упразднению финансовых покрытий.

Таким образом, анализ системных проблем выявления профессионального травматизма и заболеваний в России и на Западе показывает, что анализ и мониторинг профессиональных рисков затруднены и представляют собой довольно сложные процедуры. Из-за отсутствия надлежащих систем учета и уведомления в России отсутствует официальная

статистика происшествий на организациях. В ходе СУОТ на большом количестве предприятий все чаще выявляются нарушения в технологических процессах, низкое качество проведения аттестации рабочих мест, усложненный процесс получения сертификации СУОТ на предприятиях или ее полное отсутствие. В этой связи целью данной статьи является обоснование СУОТ, базирующейся на системном управлении рисками, с помощью инструментов, используемых руководителями и специалистами по охране труда в странах Европы и России. Рассмотрение цели предполагает следующие задачи: оценить эффективность работы сравниваемых систем управления охраной труда в Европе и России и разработать предложения по оптимизации системы управления охраной труда в стране.

**Методология** исследования представлена следующим алгоритмом. Вначале изучения темы применялся метод контекстуального анализа проблем, связанных с профессиональным риском, порождаемым неблагоприятными факторами производства.

Анализ проблемного контекста показал, что введение системы СОУТ, заменившей прежнюю сертификацию рабочих мест, не смогла остановить рост тяжести несчастных случаев на производстве. Согласно методике Международной организации труда (МОТ), Россия является страной с несовершенным учетом несчастных случаев и профессиональных заболеваний. Достоверность статистических данных в таких странах должна быть основана на том предположении, что смертельный травматизм регистрируется лучше остальных травм и заболеваний. Поскольку достоверность расчетов вероятного общего числа пострадавших базируется на статистике смертельных случаев, постольку переход от числа погибших к общему числу пострадавших на российских предприятиях представлен отношением 1:22 (для сравнения 1:1732 в Германии). Оно указывает на огромную «дыру» в массиве данных, которыми оперирует официальная статистика. Значительное количество травм и заболеваний не учитывается, несмотря на уменьшение официально зарегистрированных случаев травматизма, включая травмы с летальным исходом. Расчеты НИИ медицины труда РАМН убедительно показывают рост удельного веса численности больных с профессиональными заболеваниями по отношению к числу проходивших обязательные медосмотры. Он равен 7,7%, что составляет более 60 тыс. человек и, очевидно, превышает официально регистрируемое число 9000–12000 случаев в год. Выявленные закономерности возникновения профессионального риска представлены в контексте связи профессионального травматизма и заболеваний с динамикой изменения вредных и опасных производственных факторов во время трудового стажа работников.

**Результаты.** XX-й век стал свидетелем быстрого развития технологий с внедрением новых методов работы и процедур, а также ряда новых внутренних

опасностей для здоровья и безопасности, связанных с самими производственными процессами [26, 27]. В то же время была проведена разработка нормативно-правовой базы, начатая с фокусировки на компенсациях пострадавшим от производственного травматизма и техническом их предотвращении в соответствии с процессом развития законодательства в области охраны труда каждой отдельной страны [28, 29]. Европейский союз всегда устанавливал продвинутое правила для защиты здоровья и безопасности работников. Так, напр., в Римском договоре (1957) вопросы охраны труда и техники безопасности были рассмотрены в качестве ключевых областей деятельности Европейского сообщества [4]. Данный прогрессивный документ инициировал принятие конкретных национальных законов в Европе и Северной Америке. Первая общая и всеобъемлющая законодательная база по охране труда была принята в 1989 г. Речь идет о Рамочной директиве Совета ЕС (Директива 89/391/ЕЕС от 12.06.1989 г. о введении мер, способствующих улучшению безопасности и гигиене труда). Кроме того, было выпущено 65 подобных директив, что позволило дать более подробные и точные положения по конкретным аспектам производственного травматизма.

С момента принятия Рамочной директивы в 1989 г. начался активный процесс переосмысления и внедрения нормирования охраны труда, что оказало сильное влияние на организацию и предоставление услуг в сфере безопасности труда на производстве, а также на исследовательскую инфраструктуру в данной области [30]. Помимо разработки политики, Европейские страны играют ведущую роль в области исследований по охране труда: напр., европейские исследования связи между асбестом и раковыми заболеваниями или воздействием бензола и лейкемией могут считаться первыми важными открытиями в области охраны труда в XX веке [31]. Для осуществления и укрепления своей политики в области безопасности и охраны здоровья на рабочем месте Европейская комиссия приняла две последующие Стратегии Сообщества (2002-2006 и 2007-2012 гг.), в которых основное внимание уделяется концепциям глобального и комплексного содействия благополучию на рабочем месте [32]. В РФ управление промышленной безопасностью, по большей части, имеет «процедурный» характер. Лицензионные требования к использованию опасных объектов производства должны быть соблюдены в любом случае, пусть даже чисто формальным образом. Разнообразные аспекты законодательства, относящиеся к промышленной безопасности, многочисленные рамочные и подзаконные документальные требования – все они предусматривают необходимость долгих процедурных и формально-бюрократических согласований, полная реализация которых подтверждается наличием определенного рода «бумаг» – договоров страхования, аренды опасного производственного

объекта и др.

Несмотря на ежегодное увеличение затрат на охрану труда, количество рабочих мест с неудовлетворительными условиями труда не уменьшилось. Объем затрат по охране труда на одного работника указывает на то, что в целом расходы связаны с системой СОУТ, медицинским обслуживанием, приобретением спецодежды и средств индивидуальной защиты. По данным Министерства труда и социальной защиты РФ, потери и издержки из-за неудовлетворительного состояния условий труда каждый год обходятся в 1,6 трлн. руб. Речь идет об экономических издержках из-за потерь рабочего времени (1,31 трлн. руб. – 84,5%); расходах по возмещению ущерба, причиненного здоровью работников, и на обеспечение средств индивидуальной защиты (141,3 млрд. руб. – 9,1%); досрочных пенсионных выплатах (49,9 млрд. руб. – 3,2%); выплатах на обеспечение страховых взносов (51 млрд. руб. – 3,2%). Очевидно, что потери рабочего времени составляют львиную долю издержек, идущих на покрытие серьезных недостатков в реализации мероприятий СОУТ. Как отмечено рядом авторов, в условиях, когда структура опасных и вредных производственных факторов с негативным воздействием на здоровье работников, не претерпела никаких изменений ни со стороны количества, ни со стороны качества, растет зазор между безопасным стажем и пенсионным (т.е. величина неприемлемого риска). Это означает, что риск, непосредственно связанный с динамикой изменения вредных и опасных производственных факторов во время трудового стажа работника, в зоне гомосферы резко возрастает и делает высокий риск профессиональных заболеваний неизбежным. Непревышение приемлемого значения в течение трудового стажа до достижения пенсионного возраста становится невозможным. В результате, безопасность производственной среды оказывается под большим вопросом, в частности, в строительной сфере.

При сравнении процедуры СОУТ с прежним режимом сертификации рабочих мест на предмет качества условий труда становится ясно, что число сотрудников, относительно которых проводят оценку условий труда на соответствие требованиям охраны труда как в целом, так и по некоторым опасным и вредным производственным факторам, не только не уменьшилось, но и возросло. Причиной тому послужило изменение методики проведения СОУТ, в ходе которой не оценивался целый ряд параметров, характеризующих вредные и опасные факторы производства и трудового процесса, что, в конечном итоге, обусловило значительно заниженные статистические данные по производственному травматизму по сравнению с данными официальной статистики. Все это не позволяет усовершенствовать и сделать эффективной СУОТ.

**Обсуждение.** Считается, что иногда сама по себе разработка мероприятий СУОТ может предотвратить

несчастные случаи и профессиональные заболевания. Такой «формально-бюрократический», «процедурный» подход требует от сотрудников предприятий периодически выполнять некий перечень процедур, предписанных менеджерами с целью минимизировать компрометирующую статистику по травматизму. В долгосрочной перспективе «процедурный» подход, по сути дела, является неэффективным и небезопасным с точки зрения обеспечения надежности СУОТ. В России и индустриально развитых странах «нормология» промышленной безопасности является предметом государственно-частного партнерства (ГЧП). Но в российском варианте преобладает государственный (командно-системный) компонент, а в западном – частный (с опорой на индивидуальную инициативу и заинтересованность). Напр., российскими госорганами не проводятся экспертиза промышленной безопасности, но специализированными бизнес компаниями с лицензированными в этой области аудитами. Полученные заказчиками выводы о состоянии производственной безопасности направляются для регистрации в Ростехнадзор. Напротив, западную модель можно назвать, правильнее, частно-государственной, нежели ГЧП в российской варианте [33].

Следует подчеркнуть, что в западных странах проекты промышленной безопасности отделены от планировочных решений в области охраны труда. Этому есть свое объяснение. Управление промышленной безопасностью (скажем, в США) осуществляется посредством разработки программ производственной безопасности, в том числе через реализацию программ добровольной защиты и процедур сертификации. Претендентам на участие в подобных проектах необходимо направить свои заявления территориальному органу Управления охраны труда и получить техническое задание для последующего представления конкретных результатов в своих организациях. В контексте полученного задания соискатели направляют предложения региональному органу управления. В случае утверждения проектов деятельности для их предприятий назначается комплексная проверка и специальная оценка условий труда инспекционной группой. Участниками добровольной программы производственной безопасности становятся предприятия, прошедшие контрольную проверку. Впоследствии им необходимо каждый год обеспечивать внутренний аудит программ производственной безопасности. Управление охраны труда после выполнения плановой выездной проверки проводит СОУТ (*periodic on-site assessment*). В будущем указанная оценка проводится чиновниками управления раз в 3–5 лет, или внепланово для расследования несчастного случая на производстве, или в случае поступивших жалоб от персонала предприятия [24].

Еще раз отметим, что изучение условий труда и их

влияния на здоровье трудящихся в Европе началось раньше, чем в России. Реальное улучшение условий труда, уменьшение травматизма, производственная дисциплинированность по сей день прогрессируют на Западе. Отсутствие большого количества законов и правил, бумажной рутины дает индустриально развитым странам карт-бланш – полную свободу действий – в культивировании эффективной организации охраны труда. В сравнении с западной культурой безопасности и охраны труда российской системе предстоят сложнейшие задачи по отказу от неэффективной и затратной «процедурной» модели и внедрению управленческой системы, которая потребует кадров нового поколения с компетенциями новых подходов оценки безопасности и охраны труда, перестройки на европейский лад, значительного сокращения числа затрат на штрафы, пошлины, а самое главное – реального уменьшения несчастных случаев на предприятиях, упрощения системы документооборота и предъявления объективных статистических данных по профессиональному травматизму и заболеваниям.

**Выводы.** Таким образом, подводя итог сравнительному анализу культуры безопасности и охране труда в европейских странах и России, необходимо сделать следующие выводы:

1) выплачивая финансовые компенсации работникам, российские работодатели стремятся скрыть количество несчастных случаев;

2) если работодатели не заинтересованы в создании благоприятных условий труда в своих организациях, то итог выражается в повышенной уплате страховых выплат;

3) незаинтересованность страховщиков в проведении мероприятий по сокращению производственного травматизма и заболеваний не позволяет эффективно использовать финансовые средства ФСС;

4) показатель соотношения между смертельным травматизмом и общим числом несчастных случаев в России почти в 1000 раз превышает показатели стран Евросоюза, что говорит о недостоверности статистических данных по случаям производственных травм, в том числе и с летальным исходом;

5) существенное расхождение фактического безопасного стажа к значению безопасного стажа в рамках нормативных условий труда является одной из главных причин неэффективности «бюрократических» мероприятий по снижению тяжести труда в России;

6) свою отрицательную роль для деградации культуры безопасности в России играют: недостаток опыта разработок, ввода и сертификации СУОТ на предприятиях; упадок трудовой производственной дисциплины и как следствие – нарушение технологических процессов; некачественная реализация мероприятий СОУТ на рабочих местах; несоответствующий высоким европейским стандартам безопасности и охраны труда мониторинг выполнения организационных и штатных процессов

и проч.

Соответственно, в результате анализа производственного травматизма (общего и со смертельным исходом) можно предложить следующие рекомендации по оптимизации системы управления охраной труда:

1) с целью экономического стимулирования работодателей и улучшения условий труда следует повысить планку финансового обеспечения предупредительных мероприятий по охране труда с 20% до 30% от суммы страховых выплат за предыдущий год;

2) следует развивать и поддерживать экономическую заинтересованность работодателей в снижении производственного травматизма до минимального уровня для получения максимальной скидки к страховому тарифу (40% от установленного ФСС страхового тарифа). И, наоборот, максимальные надбавки к страховому тарифу (те же 40%) выплачивают те руководители предприятий, у которых уровень производственного травматизма и профессиональных заболеваний значительно превышает нормы, установленные действующим законодательством;

3) для эффективного использования финансовых средств ФСС необходимы объективный мониторинг и проверка договоров руководителей с медицинскими учреждениями, выявляющими профессиональные заболевания и отвечающими за медосмотры в соответствии с нормативно-законодательной базой оценки качества оказания медицинской помощи и диагностики новых патологических процессов. Также нужно проводить мониторинг риска по уровням воздействия вредных факторов, профессиональной заболеваемости и отклонений в состоянии здоровья и ввести соответствующее ранжирование значений профессионального риска (сверхвысокий, очень высокий, высокий, средний, малый). На основании оценки профессиональных рисков устанавливается достоверность производственной обусловленности травм и заболеваний у персонала предприятия. В результате, анализ воздействия производственных условий на организм сотрудников и количественная оценка условий труда позволяют дать вероятностную оценку рискам возникновения профессиональных заболеваний. В конечном итоге, профилактика несчастных случаев и профессиональных заболеваний, достоверность их определения и получение работодателями максимальной прибыли от страхования будут способствовать заинтересованности в официальной регистрации профзаболеваний, а финансовые средства ФСС будут стимулировать снижение уровня производственного травматизма и заболеваний за счет правильно установленных льгот и надбавок к страховому тарифу;

4) при рекомендуемом Международной организацией труда показателе травматизма число пострадавших на производстве в России (1 случай гибели на 500-1000 травм) могло составить 1,0-2,1 млн по сравнению с 39,9 тыс. зарегистрированных

официальной статистикой. Необходимо использовать указанные показатели для усовершенствования системы учета смертности в трудоспособном возрасте. В рамках реализации концепции демографической политики в РФ необходимо улучшать условия и охрану труда за счет внедрения новой системы управления охраной труда, основанной на оценке профессиональных рисков, введения учета микротравм, полученных работниками, профилактики профессиональных заболеваний, основанной на постоянном выявлении опасностей на рабочих местах, создания реальной информационной базы для принятия обоснованных управленческих решений;

5) следует привести в соответствие фактический безопасный стаж к значению безопасного стажа в рамках нормативных условий труда за счет усовершенствования перечней профессиональных заболеваний, вредных и опасных производственных факторов и работ, требующих обязательных предварительных и периодических медицинских осмотров, порядка их проведения для работников, занятых на тяжелых работах и на работах с вредными и опасными условиями. Рекомендуется обязательное обследование всех работников, имеющих дело с вредными производственными факторами, независимо от класса условий труда. Внести изменения в нормативные акты по профзаболеваниям. Скажем, приемлемый риск ( $1 \times 10^{-3}$ ) для работников нефтедобывающего предприятия может обеспечиваться ограничением стажа работы до 3–4 лет;

6) новая система управления охраной труда должна реализовываться в рамках Концепции демографической политики в России по сокращению смертности в трудоспособном возрасте. Ранее действовавшая неэффективная система, ориентированная на разного рода доплаты за работы во вредных, опасных и тяжелых условиях труда, а также компенсации за профессиональные заболевания и травматизм, должна быть заменена современной европейской системой, основанной на оценке профессиональных рисков. Следует разрабатывать такой подход к управлению охраной труда, чтобы можно было оценку профессионального риска сделать краеугольным камнем законодательства о безопасности и охране здоровья работников.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. ГОСТ Р 12.0.010 – 2009. Система стандартов безопасности труда. Системы управления охраной труда: определение опасностей и оценка рисков. – Введ. 2011-01-01 – М.: Изд-во стандартов, 2019.
2. ГОСТ Р 12.0.007–2009 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Система управления охраной труда в организации: общие требования по разработке, применению, оценке и совершенствованию – Введ. 2010-07-01 – М.: Изд-во стандартов, 2019.
3. ГОСТ 12.0.230-2007 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Система управления охраной труда: общие требования – Введ. 2009-07-01 – М.: Стандартинформ, 2019.
4. ГОСТ 12.0.230.1-2015 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Система управления охраной труда:

руководство по применению ГОСТ 12.0.230-2007 – Введ. 2017-03-01 – М.: Стандартинформ, 2019.

5. ГОСТ 12.0.230.2-2015 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Система управления охраной труда: Оценка соответствия. Требования – Введ. 2017-03-01 – М.: Стандартинформ, 2019.

6. ГОСТ 12.0.230.3 – 2016 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Система управления охраной труда: Оценка результативности и эффективности – Введ. 2018-01-01 – М.: Стандартинформ, 2019.

7. Смирнова Е.Э., Ларин Д.В. Оценка рисков как часть системы управления охраной труда на предприятии // Актуальные проблемы охраны труда. Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – СПб.: СПбГАСУ, 2018. – С. 135–138.

8. Ларин Д.В., Смирнова Е.Э., Совершенствование мероприятий, направленных на обеспечение безопасности при проведении строительно-монтажных работ на высоте // Архитектура - строительство - транспорт. Материалы 73-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета. В 3-х частях. – СПб.: СПбГАСУ, 2017. – С. 172–174.

9. Казанцева Я.В., Смирнова Е.Э., Оценка рисков безопасности труда в российских и международных стандартах // Развитие рынков «зеленого» финансирования в России и мире. Сборник статей I Международной научно-практической конференции. – Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2020. – С. 95–101.

10. Бахарева А.А., Смирнова Е.Э., Повышение культуры безопасности в РФ и странах ЕЭС: Аспекты и проблемы // Безопасность – 2021. Материалы XXVI Всероссийской студенческой научно-практической конференции с международным участием. – Иркутск: ИРНИТУ, 2021. – С. 58–60.

11. Dentch M.P. The ISO 45001: Guidance on Building an Occupational Health and Safety Management System. – Milwaukee, WI: Quality Press, 2018.

12. Derrick N., Gauthier F. Classification of risk acceptability and risk tolerability factors in occupational health and safety // Safety Science. – Vol. 92. – С. 138–147. DOI:10.1016/j.ssci.2016.10.003

13. Idrisova J.I., Myasnikov V.N., Uljanov A.I., Belina N.V. Increasing the efficiency of labor protection in the enterprise // Kwahakhoe, H.C. (ed.), 32nd International Conference on Information Networking (ICOIN 2018). – New York: IEEE Computer Society, 2018. – С. 586–588. DOI: 10.1109/ICOIN.2018.8343186

14. Uspko A, Uljanov A. Assessment of occupational risk of enterprises producing energy using sources of ionizing radiation // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 221. – С. 03004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022103004>

15. Суховская О.А., Куликов В.Д. Курение: современное состояние проблемы в РФ // Астма и аллергия. – 2016. – № 4. – С. 3–7.

16. Сорокин Г.А., Сюрин С.А. Оценка влияния вредных условий труда и курения на здоровье работников промышленных предприятий // Гигиена и санитария. – 2019. – Т. 98. – № 6. – С. 646–651. DOI: <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-6-646-651>

17. Сорокин Г.А., Суслев В.Л. Оценка вредности условий труда на судостроении по показателям риска здоровью судостроителей. Судостроение. – 2017. – № 1. – С. 57–59.

18. Bauman C.W., Skitka L.J. Corporate social responsibility as a source of employee satisfaction // Research in Organizational Behavior. – 2012. – Vol. 32. – С. 63–86.

19. Вадулина Н.В., Галлямов М.А., Девятова С.М. Профессиональная заболеваемость в России: проблемы и решения // Безопасность техногенных и природных систем. – 2020. – Т. 3. – № 1. – 7–15. DOI: 10.23947/2541-9129-2020-3-7-15

20. Тихонова Г.И., Чуранова А.Н. Многолетний анализ особенностей учета несчастных случаев на производстве в России // Демографическое обозрение. – 2019. – Т. 6. – № 2. – С. 142–164.

21. Атаманчук А.А., Кабанова Т.Г. Системные проблемы выявления профессиональных заболеваний в Российской Федерации // Российский журнал гигиены труда и промышленной экологии. – 2015. – Т. 9. – № 1. – С. 25–25.

22. Левашов С.П. Мониторинг и анализ профессиональных рисков в России и за рубежом. Курган: Изд-во гос. ун-та, 2013.

23. Евстигнеева Н.А. Статистика условий труда после введения порядка специальной оценки условий труда // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. Т. 8. № 5. С. 673–677.

24. Hämäläinen P., Saarela K.L., Takala J. Global trend according to estimated number of occupational accidents and fatal work-related diseases at region and country level. Journal of Safety Research. – 2009. – Vol. 40. – N 2. – С. 125–139 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2008.12.010>

25. Лукьянчикова Т.Л., Ямщикова Т.Н., Клецова Н.В. Компаративистский анализ производственного травматизма: Россия и мир. Экономика Труда. 5(3), 647–662 (2018). <https://doi.org/10.18334/et.5.3.39334>

26. Быстрова Е.Д., Смирнова Е.Э. Обеспечение безопасности производственных помещений путем снижения шумового воздействия от вентиляционного оборудования // Безопасность в строительстве. Материалы III Международной научно-практической конференции. – СПб.: СПбГАСУ, 2017. – С. 89–92.

27. Руданец А.В., Смирнова Е.Э. Повышение безопасности строительства при работах по возведению большепролетных мостов // Безопасность в строительстве. Материалы III Международной научно-практической конференции. – СПб.: СПбГАСУ, 2017. – С. 97–99.

28. Смирнова Е.Э., Соломатин И.А. Принципы безопасности производства в РФ и европейских странах: Сравнительный анализ // Актуальные проблемы строительства, ЖКХ и техносферной безопасности. Материалы VIII Всероссийской (с международным участием) научно-технической конференции молодых исследователей. – Волгоград: ВолГТУ, 2021. – С. 78–79.

29. Смирнова Е.Э., Соломатин И.А. Оценка статистики производственного травматизма в России и европейских странах // Безопасность в строительстве. Материалы V Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – СПб.: СПбГАСУ, – 2021. – С. 80–88.

30. Hämäläinen R.M. The Europeanisation of occupational health services: A study of the impact of EU policies (Ser.: People and Work Research Reports, 82). – Helsinki: Finnish Institute of Occupational Health, 2008, – 403 p.

31. Agius R. Academic occupational medicine: its role and its future // Occupational Medicine. – 2005. – Vol. 55. – С. 247–249.

32. Iavicoli S., Rondinone B.M., Buresti G., Boccuni F. Forecast on future occupational safety and health challenges in Europe and Italy // Working Environment Challenges for the Future, International Expert Seminar Copenhagen 24–25 September 2009. – Copenhagen: Danish Working Environment Authority and Partnership for European Research in Occupational Safety and Health (PEROSH), 2009. – С. 35–38.

33. Hordiichuk L.M. Monitoring of the operation of the control system labor protection at the enterprise // Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького. – 2018. – Vol. 20. – № 86. – С. 135–137.

*Статья поступила в редакцию 28.07.2022*

*Статья принята к публикации 16.09.2022*