



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

Основан в 2011 г.

18+

Том 7  
№ 1 (41)  
2018

Журнал выходит  
4 раза в год

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  
Алехина Марина Анатольевна, доктор физико-математических наук, профессор  
Ефремова Сания Юнусовна, доктор биологических наук, профессор  
Политаева Наталья Анатольевна, доктор технических наук, профессор  
Румянцев Константин Евгеньевич, доктор технических наук, профессор  
Чулков Валерий Александрович, доктор технических наук, доцент

## **Редакционная коллегия:**

Аканова Наталья Ивановна, доктор биологических наук, профессор  
Акинин Николай Иванович, доктор технических наук, профессор  
Алексеев Геннадий Валентинович, доктор технических наук, профессор  
Антипов Сергей Тихонович, доктор технических наук, профессор  
Базарнова Юлия Генриховна, доктор технических наук, профессор  
Богданов Андрей Владимирович, доктор технических наук, профессор  
Бурахта Вера Алексеевна, доктор химических наук, профессор  
Васенев Иван Иванович, доктор биологических наук, профессор  
Васильев Андрей Витальевич, доктор технических наук, профессор  
Громов Юрий Юрьевич, доктор технических наук, профессор  
Дворецкий Станислав Иванович, доктор технических наук, профессор  
Квятковская Ирина Юрьевна, доктор технических наук, профессор  
Кемалов Берик Каирович – кандидат технических наук, PhD  
Кручинина Наталия Евгеньевна, доктор технических наук, профессор  
Лавендел Юрий Оскарович, Candidate of the Technical Sciences, LR Dr.sc.ing  
Маскевич Сергей Александрович, доктор физико-математических наук, профессор  
Махмудова Любовь Ширваниевна, доктор технических наук, профессор  
Михеев Михаил Юрьевич, доктор технических наук, профессор  
Пашенко Дмитрий Владимирович, доктор технических наук  
Первухина Елена Львовна, доктор технических наук, профессор  
Петрова Ирина Юрьевна, доктор технических наук, профессор  
Прохоров Сергей Антонович, доктор технических наук, профессор  
Рыжаков Виктор Васильевич, доктор технических наук, профессор  
Стороженко Павел Аркадьевич, член-корреспондент Российской академии наук, доктор химических наук, профессор  
Сычев Виктор Гаврилович, академик Российской академии наук, доктор сельскохозяйственных 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  
Ципенко Антон Владимирович, доктор технических наук, профессор

## **Ответственный секретарь**

Жарова Олеся Сергеевна, кандидат философских наук

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:  
Н. В. Хлопцева

Технический редактор:  
О. С. Жарова

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 21.03.2018.  
Выход в свет 28.03.2018.  
Формат 60X84 1/8  
Печать ризография.  
Усл. печ. л. 8,25.  
Тираж 100 экз. Заказ № 1352.

## 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, заведующий кафедрой «Пищевые производства» (Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Россия)

Алехина Марина Анатольевна, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Математика»

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

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

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

Политаева Наталья Анатольевна, доктор технических наук, профессор, профессор Высшей школы биотехнологии и пищевых технологий

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

Румянцев Константин Евгеньевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационная безопасность телекоммуникационных систем»

(Инженерно-технологическая академия, Южный федеральный университет, г. Таганрог, Россия)

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

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

### **Редакционная коллегия:**

Аканова Наталья Ивановна, доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник (ФГУП «НИЦ Экобезопасность», г. Москва, Россия)

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

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

Алексеев Геннадий Валентинович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Процессы и аппараты пищевых производств»

(Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, информатики и оптики, г. Санкт-Петербург, 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)

Богданов Андрей Владимирович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Переработка сельскохозяйственной продукции и безопасность жизнедеятельности»

(Южно-Уральский государственный аграрный университет, г. Челябинск, Россия)

Бурахта Вера Алексеевна, доктор химических наук, профессор, проректор по научной работе

(Западно-Казахстанский инновационно-технологический университет, г. Уральск, Республика Казахстан)

Васенев Иван Иванович, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой «Экологии» (РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, г. Москва, Россия)

Васильев Андрей Витальевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Химическая технология и промышленная экология»

(Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия)

Громов Юрий Юрьевич, доктор технических наук, профессор, декан факультета «Информационные технологии»

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

Дворецкий Станислав Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств»

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

Квятковская Ирина Юрьевна, доктор технических наук, профессор, директор института информационных технологий и коммуникаций

(Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань, Россия)

Кемалов Берик Каирович – кандидат технических наук, PhD, заместитель начальника департамента образования и науки министерства обороны  
(Республика Казахстан, г. Астана)

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

Лавендел Юрий Оскарович, Candidate of the Technical Sciences, LR Dr.sc.ing, Professor of the Department of Software Engineering  
(Rīgas Tehniskā universitāte, Латвия)

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)

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

Пащенко Дмитрий Владимирович, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Вычислительная техника»  
(Пензенский государственный университет, г. Пенза, Россия)

Первухина Елена Львовна, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных систем  
(Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Россия)

Петрова Ирина Юрьевна, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Системы автоматизированного проектирования»  
(Астраханский инженерно-строительный институт, 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)

Рыжаков Виктор Васильевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Техническое управление качеством»  
(Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Россия)

Стороженко Павел Аркадьевич, член-корреспондент Российской академии наук, доктор химических наук, профессор, генеральный 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)

Сычев Виктор Гаврилович, академик Российской академии наук, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, директор ГНУ ВНИИ Агрехимии  
(ГНУ ВНИИ Агрехимии, г. Москва, Россия)

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

Тихомирова Елена Ивановна, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой «Экология»  
(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 технический университет, г. Калининград, Россия)

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

Ципенко Антон Владимирович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Физика»  
(Московский авиационный институт, г. Москва, Россия)

## СОДЕРЖАНИЕ

*информатика, вычислительная техника и управление*

<b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ВНЕДРЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ</b> Котов Николай Александрович.....	6
<b>ПРИМЕНЕНИЕ АДАПТИВНОГО АЛГОРИТМА ЭЛЛИПСОИДОВ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЗАПРЕТОВ БУЛЕВЫХ И К-ЗНАЧНЫХ ФУНКЦИЙ</b> Лапиков Игорь Игоревич, Никонов Владимир Глебович, Никонов Николай Владимирович.....	11
<b>ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНИВАНИЯ ПРЕДПОЧТЕНИЙ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ СТОХАСТИЧЕСКИХ И НЕЧЕТКИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ</b> Рыжаков Михаил Викторович, Рыжаков Виктор Васильевич, Портнова Ирина Михайловна .....	17
<b>ИНТЕРПОЛИРУЮЩИЕ ШИМ-МОДУЛЯТОРЫ В ТЕХНИКЕ ПЕРЕДАЧИ И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СИГНАЛОВ</b> Чулков Валерий Александрович.....	21

*технология продовольственных продуктов*

<b>РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПОПРАВКИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЖАРКИ ВО ФРИТЮРЕ</b> Гайсин Ирек Анасович, Ибрафиллов Ирек Хуснемарданович.....	25
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ ПЛОДОВ ОБЛЕПИХИ РАЗЛИЧНОЙ СОРТНОСТИ, ПОЛУЧЕННОЙ ПРИ КАВИТАЦИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ</b> Нициевская Ксения Николаевна, Мотовилов Олег Константинович, Чекрыга Галина Петровна.....	30
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ АНТИОКСИДАНТОВ В ОВОЩАХ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ</b> Смоленцева Алла Алексеевна, Елисеева Светлана Анатольевна, Котова Наталья Петровна.....	35
<b>ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ОКСИДИРОВАНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ</b> Чуфистов Олег Евгеньевич, Чуфистов Евгений Алексеевич.....	40

*безопасность деятельности человека*

<b>АНАЛИЗ ЗАБОЛЕВАЕМОСТИ РАБОТНИКОВ ПАССАЖИРСКОЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СЛУЖБЫ</b> Королева Анна Михайловна, Пономарев Валентин Михайлович, Аксёнов Владимир Алексеевич, Юдаева Оксана Сергеевна, Козлов Александр Сергеевич.....	44
<b>ЗАБОЛЕВАЕМОСТИ С ВРЕМЕННОЙ УТРАТОЙ ТРУДОСПОСОБНОСТИ КАК ИНСТРУМЕНТ ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ РАБОЧИХ МЕСТ</b> Андрусов Вадим Эдуардович, Николайкин Николай Иванович, Худяков Юрий Григорьевич.....	50
<b>ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК ЖИДКОГО СТЕКЛА НА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ ИНЪЕКЦИОННЫХ РАСТВОРОВ</b> Панфилова Марина Ивановна, Зубрев Николай Иванович, Новоселова Ольга Викторовна, Панфилова Ирина Сергеевна.....	57
<b>УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ ДЛЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЕТОВ, СВЯЗАННЫМИ С НЕБЛАГОПРИЯТНЫМИ МЕТЕОУСЛОВИЯМИ</b> Рыбалкина Александра Леонидовна, Трусова Елена Игоревна, Шаров Валерий Дмитриевич.....	61
<b>КРИТЕРИЙ ГУРВИЦА ДЛЯ ПРОВЕРКИ УСТОЙЧИВОСТИ ЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ОКРЕСТНОСТНЫХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД</b> Седых Ирина Александровна, Сметанникова Анастасия Михайловна.....	67

## CONTENT

### *Information Science, Computing Devices and Controlling*

#### **CHARACTERIZATION OF AN AUTOMATED SYSTEM FOR IMPLEMENTATION IN PRODUCTION PROCESSES**

Kotov Nikolay Aleksandrovich, Pogorelov Victor Ivanovich..... 6

#### **THE ELLIPSOIDS ADAPTIVE ALGORITHM APPLICATION FOR THE BOOLEAN AND K-VALUED FUNCTIONS TABOO AND SEMITABOO RESEARCH**

Lapikov Igor Igorevich, Nikonov Vladimir Glebovich, Nikonov Nikolay Vladimirovich... 11

#### **PECULIARITIES OF ESTIMATING THE PREFERENCES OF NETWORKS BASED ON STOCHASTIC AND FUZZY REPRESENTATIONS**

Ryzhakov Mikhail Viktorovich, Ryzhakov Viktor Vasilievich, Portnova Irina Mikhailovna..... 17

#### **THE INTERPOLATING PWM MODULATORS FOR SIGNAL TRANSMISSION AND CONVERSION TECHNIQUE**

Chulkov Valery Alexandrovich ..... 21

### *Food Technology*

#### **RHEOLOGICAL CORRECTIONS TO MODELING OF THERMOPHYSICAL FRYING PROCESSES IN FRYING OIL**

Gajsin Irek Anasovich, Israfilov Irek Husnemardanovich..... 25

#### **THE STUDY OF SEMI-PRODUCTS FROM SEA BUCKTHORN FRUITS OF DIFFERENT GRADES, OBTAINED UNDER THE ACTION OF CAVITATION**

Nitievskaya Ksenia Nikolaevna, Motovilov Oleg Konstantinovich, Chekryga Galina Petrovna..... 30

#### **INVESTIGATION OF THE TOTAL AMOUNT OF ANTIOXIDANTS IN VEGETABLES FOR IMPROVEMENT OF TECHNOLOGY OF FUNCTIONAL FOODSTUFFS**

Smolentseva Alla Alekseevna, Eliseeva Svetlana Anatolyevna, Kotova Natalya Petrovna..... 35

#### **APPLICATION OF ELECTROCHEMICAL OXIDATION FOR TREATMENT OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT ELEMENTS OF FOOD INDUSTRY**

Tchufistov Oleg Evgenevich, Tchufistov Evgenij Alekseevich ..... 40

### *Human Activity Safety*

#### **ANALYSIS OF MORBIDITY OF EMPLOYEES OF PASSENGER RAILWAY SERVICE**

Koroleva Anna Mikhailovna, Ponomarev Valentin Mikhaylovich, Aksenov Vladimir Alekseevich, Yudaeva Oksana Sergeevna, Kozlov Alexander Sergeevich..... 44

#### **INCIDENCES WITH TEMPORARY DISABILITY AS THE TOOL OF WORKPLACES SAFETY ASSESSMENT**

Andrusov Vadim Eduardovich, Nikolaykin Nikolay Ivanovich, Khudyakov Yurii Grigoryevich..... 50

#### **INFLUENCE OF LIQUID GLASS ADDITIVES ON INJECTION SOLUTION STRUCTURE**

Panfilova Marina Ivanovna, Zubrev Nikolay Ivanovich, Novoselova Olga Viktorovna, Panfilova Irina Sergeevna..... 57

#### **SAFETY RISK MANAGEMENT RELATED TO ADVERSE WEATHER CONDITIONS**

Rybalkina Alexandra Leonidovna, Trusova Elena Igorevna, Sharov Valery Dmitriyevich..... 61

#### **HURVITS CRITERION FOR VERIFICATION OF SUSTAINABILITY OF LINEAR DYNAMIC NEIGHBORHOOD MODELS OF THE WASTEWATER TREATMENT PROCESS**

Sedykh Irina Alexandrovna, Smetannikova Anastasiya Mikhailovna..... 67

УДК 004.031.42

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ВНЕДРЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ

© 2018

**Котов Николай Александрович**, аспирант

*Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий,  
механики и оптики*, Академия ЛИИМТУ

(196135, Санкт-Петербург, улица Гастелло, д.12, лит. А, e-mail: roy2048@yandex.ru)

**Погорелов Виктор Иванович**, доктор технических наук,  
профессор кафедры «Компьютерного проектирования и дизайна»

*Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий,  
механики и оптики*, Академия ЛИИМТУ

(196135, Санкт-Петербург, улица Гастелло, д.12, лит. А, e-mail: pogvic@mail.ru)

**Аннотация.** В данной статье рассмотрены важные характеристики автоматизированной системы, которые влияют на ее качество, эффективность, надежность и возможность использования в государственных учреждениях. Для того, чтобы добиться получения этих свойств необходимо использовать нормативные документы. Однако в них из-за устаревания (или же отмены), а также зачастую наличия общего описания системы, невозможно говорить о полноте качества итогового продукта. Поэтому для решения данной проблемы была выбрана теория систем массового обслуживания. В итоге по ее базовым принципам были определены, тип и характеристики, описывающие качество системы. В тоже время характеристики несут в себе основополагающие положения для выбора ее в качестве основного инструмента для работы с геодезической опорой.

На основе полученных результатов были сформированы спецификации для оценки системы. Конечная оценка зависит от допустимого диапазона и суммы значений показателей по всем вычисленным параметрам. Выход за пределы диапазона означает, что система не прошла испытания. Ее модифицируют и «прогоняют» тест по-новому.

Влияние оценки системы является основополагающим при выборе ее в качестве системы для основных рабочих процессов. Значение оценки системы позволяет гарантировать пользователям, совместно с актуальной версией нормативных документов, ее качество и безопасность работы на всех уровнях принятия решений.

**Ключевые слова:** автоматизированная система, ГОСТ, оценка, характеристики, система массового обслуживания, требования, пользователи.

## CHARACTERIZATION OF AN AUTOMATED SYSTEM FOR IMPLEMENTATION IN PRODUCTION PROCESSES

© 2018

**Kotov Nikolay Aleksandrovich**, Postgraduate Student

*Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Academy LIMTU*  
(196135, Ul. Petersburg, Gastello ul., 12, lit. A, e-mail: roy2048@yandex.ru)

**Pogorelov Victor Ivanovich**, Doctor of Technical Sciences,  
Professor of the Department "Computer Engineering and Design"

*Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Academy LIMTU*  
(196135, Ul. Petersburg, Gastello ul., 12, lit. A, e-mail: pogvic@mail.ru)

**Annotation.** This article describes some important characteristics of an automated system that affect its quality, performance, reliability, and usability in state institutions. In order to obtain these properties, certain regulations must be applied. However, due to obsolescence (or cancel), and often presence of a General description of the system, it is impossible to talk about the completeness of the quality of the final product. Therefore, to solve this problem the theory of queueing systems was chosen. Finally, its underlying principles have been identified, the type and characteristics describing the quality system were mentioned. At the same time the features carry basic provisions that to select it as the main tool for working with geophysical support.

Specifications for system assessment were generated on the basis of the obtained results. The final score depends on the valid range and amount values for all calculated parameters. 'Out of range' means that the system is not tested. It modifies and "chases" the test in new ways.

The impact assessment system is fundamental for the quality system for key processes. The value of the appraisal system helps to ensure users complying with the latest version of regulatory documents, its quality and safety at all levels of decision-making.

**Keywords:** automated system, GOST (National State Standard), assessment, characteristics, queueing system, the requirements of users.

Современные реалии мира диктуют новые правила в построении специальных систем. Сформировался определенный подход, в котором пользователь не только может просматривать контент и выполнять над ним

примитивные операции: сохранение, открытие и т.д. Сегодня линия тренда уходит в сторону систем с «отзывом», то есть таких, где контент при различных действиях пользователя в информационном пространстве

может изменяться. Инструментом для манипуляций с данными является определенный класс программ. Это автоматизированные системы различных назначений. Интерес к ним постоянно растет за счет простоты использования, удобных функций, сокращения времени рутинных операций для пользователя; поддержкой, монетизацией для производителя [1, 2].

На протяжении всего жизненного цикла АС между пользователем и производителем происходит непрерывное «общение». Оно включает в себя поиск ошибок, выпуск обновлений, модификацию приложения, и др. Поскольку автоматизированная система довольно сложный вид инструмента, который в том числе используется и в государственных учреждениях, должен отвечать определенным требованиям. Данные требования в основном служат для определения общего качества и специализированных функций (например, повышенная безопасность модулей системы). На территории РФ на данный момент времени действуют ГОСТы и РД [3,4,5,6,7], описывающие порядок разработки системы, ее тестирование, концепции. Но введены в действие они были еще в прошлом столетии. Те базисные понятия, которые в них описываются являются совокупным обобщением общих понятий о системе. С точки зрения развития технологий, для контроля качества итоговых параметров системы, нормативную документацию следует актуализировать для будущих разработок [8].

Конечно, при проектировании АС следует придерживаться необходимых стандартов, норм и последовательностью операций. Выполнение этих мер способствует увеличению качества системы, реализации необходимого функционала, обеспечение безопасности при использовании системы.

#### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ:

1. Установить соответствия требований нормативных документов к АС получения и сдачи геодезической изученности, как новому инструменту в планировании хозяйственной деятельности регионов. Это необходимо, поскольку система может быть использована в государственных фондах;
2. Определение характеристик системы, которые необходимы для внедрения в производственную архитектуру для получения максимальной эффективности;
3. Сравнение требований к системе указанных в нормативных документах, с полученными результатами пункта 2.

#### РЕШЕНИЕ ПОСТАВЛЕННЫХ ЗАДАЧ:

В соответствии с требованиями руководящих документов и уже доступной разработки, необходимо определить, отвечает ли АС всем требованиям. От этого зависит, возможность использования ее в государственных учреждениях.

Таблица 1 – Определение возможности использования АС в государственных учреждениях, по ГОСТ 24.104-85

№ п/п	Требования	Описание выполнения	Примечание
1	Подтверждение целей создания	Выполнено	Система необходима для упрощения и оптимизации порядка получения геодезической изученности. К тому же она выполняется в виде веб-приложения, которое является универсальным инструментом запускаемом в браузере ПК. По сравнению с другими, аналогичными по принципу работы программами, имеет двустороннюю связь с ведомствами, за счет чего, решается главная проблема работы с данными, актуальностью
2	Совместимость компонентов и протоколов передачи данных (в сетях)	Выполнено	Использование аутентификации и шифрования канала. Меры являются универсальными и подходят для различных тип систем.
3	Простота и легкость модернизации и улучшения работоспособности системы в целом и модулей, в частности	Выполнено	Применяются open source решения, для изменения которых возможно использовать исходный код.
4	Надежность системы в области ее применения	Выполнено	Смотри табл. 2. Определены характеристики системы, и границы значений, когда система остается работоспособной при близких к максимальным нагрузкам
5	Адаптивность к элементам архитектуры, на которой она (АС) будет развернута	Выполнено	Использование архитектуры сервера, при которой происходит автоматическая репликация БД, и при выходе из строя одного из элементов, вся система при этом не останавливается.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ:**

Оптимальная работа автоматизированной системы зависит от выполненных требований, правил на всех этапах проектирования [9]. Каждый этап – это определенная веха в подготовке качественного конечного продукта. Особенно, если на каждом этапе введен контроль выполненных работ. Основные этапы:

- Формирование требований к АС;
- Разработка концепции АС;
- Техническое задание;
- Эскизный проект;
- Технический проект;
- Рабочая документация;
- Ввод в действие;
- Сопровождение АС.

Этапы, представленные выше, важны. Однако, из них выбраны основополагающие, от которых зависит целостность продукта, его функционал и итоговая реализация.

**Формирование требований к АС**

Раздел включает в себя описание объекта исследования и необходимость в создании АС, а также формирование максимально полных требований пользователей к конечной системе. В случае с АС получения геодезической опоры пользователю необходимо при наименьших затратах ресурсов получить наиболее полное представление о количестве данных, их качестве по объекту работ. Затем, после выполнения работ данные были бы загружены в БД системы с проверкой качества представленных результатов. Простота данного подхода, совместно с кратким временем выполнения влияет на итоговый результат.

**Разработка концепции АС**

Работа автоматизированной системы зависит от многих факторов. Учесть их при создании максимально эффективного инструмента необходимо на данном этапе. Одними из важных характеристик системы являются:

1. Скорость доступа и надежность АС;
2. Простота использования, необходимый функционал;
3. Защита личных и конфиденциальных данных.

Каждый из пунктов, описанных выше по-своему важен для конечного решения. Для получения данных о качестве системы в целом, предлагается использовать систему оценок. Оценка зависит от средних показателей системы в совокупности с допусками в которых система работает стабильно. Такой подход позволяет при выборе отраслевой АС, ориентируясь на итоговую оценку, принимать решение о ее внедрении в производственные процессы. Оценка может быть произведена как для элемента системы, так и для системы в целом.

В случае с сервисом предоставления геодезической опоры необходимо осуществить оценку по нескольким составляющим – комплексный показатель надежности [10].

Успешность в выполнении поставленных задач (процедур) определяется для каждой функции с уче-

том их специфических для каждой системы условий и параметров. Вводится понятие вероятности надежности элементов, которая определяется выражением, и применяется для измерения усредненных показателей за  $\Delta t$ :

$$L_i = L_{TC_i} \times L_{ПО_i} \times L_{ПЛ_i}, \quad (1)$$

где  $L_{TC_i}$  – вероятность отказа технического средства подсистемы;

$L_{ПО_i}$  – вероятность отказа программного обеспечения подсистемы;

$L_{ПЛ_i}$  – вероятность отказа от действий персонала.

Для обеспечения максимально точной оценки системы, так же используется теорию массового обслуживания. Данный метод позволяет охарактеризовать систему не только с точки зрения эксплуатационных свойств, но и с точки зрения конечного потребителя. Еще одним плюсом такого подхода является баланс системы, когда одни ее свойства не имеют превосходства над другими, что позволяет оптимизировать систему с учетом обеих точек зрения.

При анализе СМО определяется ряд показателей ее эффективности [10]. К ним относятся, например, число занятых каналов обслуживания; число обслуженных; вероятность того, что заявка будет обслужена; вероятность наличия очереди; экономический эффект, полученный в результате обслуживания заявки и т.д.

Для определения качественных показателей и оценки необходимо в первую очередь определить тип системы массового обслуживания. СМО делятся на одноканальные и многоканальные, с очередью и без [11].

В случае с рассматриваемой АС ее можно отнести к многоканальной, с неограниченной очередью (с ожиданием), так как количество каналов и инженеров, обрабатывающих данные будет равно  $n > 0$  и длиной очереди  $1 < m < \infty$ , что значит, что при пришедшей заявке и отсутствия возможности ее немедленной обработки, она ставится в очередь.

При детальном рассмотрении архитектуры АС получения геодезической опоры характеристики данной системы можно отнести к двум составляющим, это:

- Передача информации в сети Интернет до личного кабинета. На основе данного показателя, возможна корректировка бюджета проекта, использование архитектур;
- Работа в личном кабинете при установленной связи: пользователь – инженер фонда.

Для обеспечения максимального качества в предоставлении услуг по получению изученности и сдачи результатов в фонд, необходимо, что бы сервис был всегда доступен. Достигается это путем оптимизации каналов передачи данных, что бы они справлялись с нагрузкой. Данные меры позволяют уменьшить потерю данных в сети, снизить процент ее загруженности, и в следствии этого – увеличивается показатель отказоустойчивости доступа к АС. Поэтому необходимо определить достаточное количество каналов. Нагрузка

на канал (у) определяется в зависимости от общей загрузки каналов ( $N_k$ ) и времени необходимого для обслуживания вызова ( $T_6$ ).

$$y = N_k \times T_6,$$

Для своевременного доступа к системе и подачи заявок без задержек в канале связи рассчитаем вероятность, при которой каналы свободны рассчитываются исходя из формулы:

$$P_{\kappa_n} = \frac{1}{\sum_{k=0}^n \frac{y_k}{k!}}, \quad (2)$$

где  $k$  – последовательность целых чисел,  $k = 0, 1, 2, \dots, n$

А вероятность возникновения отказа в следствии загрузки каналов, которая снижает порог входа в АС, определяется как:

$$P_{от\kappa_n} = \frac{y^n}{n!} \times P_{\kappa_n}, \quad (3)$$

При загрузке канала равной 100 пользователям, каждый тратит на работу в АС на импорт/экспорт данных и/или формирование заявки  $\approx 45$  мин. Для определения количества каналов необходимо установить вероятность потери пользователя ( $P_{потери}$ ). В итоге должно соблюдаться условие  $P_{от\kappa_n} \leq P_{потери}$ . Принимая во внимание вероятность потери 0,01 для бесперебойного доступа к АС требуется 2 канала связи. Зная этот показатель или увеличивая требования к системе формируется точный бюджет проекта [10,12,13].

Определим также основные характеристики при работе в системе. Рассмотрим следующий алгоритм выдачи заявки. Когда пользователь переходит в личный кабинет, он первым делом формирует заявку для того, чтобы получить доступ к ресурсам БД. Делается это с помощью веб-интерфейса, в котором необходимо к заявке приложить необходимые файлы. Это документы, подтверждающие начало работ, а также лицензию на возможность производства работ. После отправки данной заявки она попадает к модератору (инженеру фонда), где он проверяет ее и выдает допуск к веб-карте, пользователю. В веб карте появляются геоточки сетей ГГС и ГНС и др. Из данных объектов пользователь выбирает нужное количество в соответствии с законодательством [14]. Затем формируется отчетный документ – выписка, которая подписывается электронной подписью, что делает ее официальным документом.

После выполнения работы пользователь загружает обновленные данные об объектах. Перед тем как закрыть заявку модератор так же проверяет данные. Они заносятся в БД и пункту, реперу присуждается определенный статус. Поскольку модераторов, проверяющих заявки, дающих доступ ограниченное количество,

появляется очередь. И в данном случае на очередь накладываются ограничения по максимальной длине и максимальному времени пребывания заявки в очереди.

Для того, чтобы очередь была минимальной определяется количество инженеров. Их количество зависит от закона «гибели и размножения» и вычисляется по формуле [15,16,17]:

$$P_0 = (1 + \frac{\rho}{1!} + \dots + \frac{\rho^n}{n!} + \frac{\rho^{n+1}}{nn!} + \frac{\rho^{n+2}}{n^2n!} + \frac{\rho^{n+m}}{n^m n!})^{-1};$$

$$P_{от\kappa_n} = \frac{\rho^n}{n!} \times P_0, \quad (4)$$

Автоматизированная система, ее качество, так же зависят от коэффициента использования. Вычисляется он исходя из среднего числа работающих инженеров и вычисляется по формуле:

$$K_u = \frac{A/\mu}{n}, \quad (5)$$

где  $A$  - абсолютная пропускная способность;  
 $\mu$  - интенсивность проверки инженером поступивших заявок, результатов работ;  
 $n$  - в данном случае число инженеров.

Система, так же не должна простаивать или быть слишком загружена входящими заявками. Данный показатель вычисляется исходя из формулы:

$$K_n = 1 - K_u, \quad (6)$$

Подводя итоги вышеописанному, систему получения изученности можно описать следующей математической моделью:

$$R_s = \{L_i, P_{от\kappa_n}, P_{от\kappa_{лк}}, K_u, K_n\},$$

Таблица 2 – Принцип простановки оценки для автоматизированной системы

Оценка	Описание показателя	Пределы оценки
$\psi_1$	Вероятность надежности элементов	$z_1 < L_i < z_2$
$\psi_2$	Вероятность возникновения отказа в следствии загрузки каналов (при подключении к личному кабинету)	$z_1 < P_{от\kappa_n} < z_2$
$\psi_3$	Вероятность занятости инженеров	$z_1 < P_{от\kappa_{лк}} < z_2$
$\psi_4$	Коэффициент использования	$z_1 < K_u < z_2$
$\psi_5$	Коэффициент простоя	$z_1 < K_n < z_2$

Из таблицы 2 видно, что пределы оценки имеют диапазон, в котором при полученных значениях система является стабильной. Если значение входит в диапазон, ставится – 1, если нет – 0 [18,19]. Итоговая оценка, и как следствие принятие решения об использовании системы является сумма оценок:

$$I = \sum_{\psi=0}^5 \psi,$$

При рассмотрении данных вопросов можно утверждать, что для обеспечения непрерывной хозяйственной

деятельности необходимо использовать нормативные документы, в первую очередь актуальные, поскольку документацию можно выделить гарантом качества при внедрении данной системы. При проектировании системы основополагающие пункты нормативных документов недостаточны для определения даже базовых характеристик, в отличие от возможности применить теорию массового обслуживания. Количество всех характеристик, рассматриваемых выше, которые необходимо определить, в конечном счете, позволяют создать сбалансированное решение для всех групп пользователей.

При выставлении итоговой оценки, необходимо определить границы диапазона с учетом экспертного сообщества. Совокупность этих мер позволяет создать универсальный инструмент сбалансированный с точки зрения затрат на него и функционала.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Самандарли С., Воронин И.И. Преимущества внедрения автоматизированных систем управления технологическими процессами на предприятии и в учреждении // Экономическая среда. – 2016. – №2(16). – С. 57–59.
2. Гришина А.А., Золотухина Е.Б., Вишня А.С., Нездольев С.А. Концепция автоматизированной системы по подбору персонала // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – №5. – С. 445–449.
3. ГОСТ 24.703-85 Единая система стандартов автоматизированных систем управления. Типовые проектные решения в АСУ. Основные положения. – Введ.1987-01-01. – Москва: Стандартинформ, 2009 г.
4. РД 50-680-88 Методические указания. Автоматизированные системы. Основные положения. – Введ 1990-01-01. – Москва: Государственный комитет СССР по стандартам, 1990 г.
5. РД 50-34.698-90 Методические указания. Информационная технология. Комплекс стандартов и руководящих документов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Требования к содержанию документов. – Введ. 1992-01-01. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2002 г.
6. ГОСТ 24.701-86 Единая система стандартов автоматизированных систем управления. Надежность автоматизированных систем управления. Основные положения. – Введ. 1987-07-01. – Москва: Стандартинформ, 2009 г.
7. ГОСТ 34.603-92 Информационная технология (ИТ). Виды испытаний автоматизированных систем. – Введ.1993-01-01. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2002 г.
8. Васильев В.И., Гвоздев В.Е., Гузаиров М.Б., Кириллова А.Д. Система поддержки принятия решений по обеспечению информационной безопасности автоматизированной системы управления технологическими процессами // Информация и безопасность. – 2017. – №4(4). – С. 618–623.
9. ГОСТ 34.601-90 Информационная технология (ИТ). Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Стадии со-

здания. – Введ.1992-01-01. – Москва: Стандартинформ, 2009 г.

10. Нестеренко О.Е., Гончаров А.М., Коченов Н.В., Ледякин И.А. Обоснование выбора характеристик и параметров процедур обработки оперативной информации в автоматизированных системах специального назначения // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2016. – №1. – С. 67–69.

11. Назаров А.А., Терпугов А.Ф. Теория массового обслуживания: учебное пособие. – 2-е изд., испр. – Томск: Изд-во НТЛ. 2010. – 228 с.

12. Сиягов, А. А. Формирование автоматизированных комплексов. Социально-экономические проблемы / А.А. Сиягов. – М.: Экономика, 2016. – 232 с.

13. Втюрин В.А. Автоматизированные системы управления технологическими процессами. Основы АСУТП. – СПб.: Санкт-Петербургская Государственная Лесотехническая Академия имени С.М. Кирова, 2006. – 152 с.

14. Приказ Министерства экономического развития "О перечне сведений, подлежащих засекречиванию" от 25 июля 2014 № 456-ДСП // Российская газета.

15. Моделирование СМО в классе непрерывных марковских процессов // Национальном Открытом Университете «ИНТУИТ» URL: <https://www.intuit.ru/studies/courses/643/499/lecture/11353?page=4>

16. Сироткин А.В. Модель системы трёхуровневого обеспечения информационного взаимодействия в асу // Инженерный вестник Дона. – 2012. – 4-1(22). – С. 64–76.

17. Каратаева О.Г. Модели системы массового обслуживания // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина». – 2009. – 8-9. – С. 75–78.

18. Лобейко В. И., Поляков С. В., Старусев А. В. Метод оценки критериев эффективности асу при заданном техническом требовании на систему // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2012. – С. 138–142.

19. Чабан Л.С. Методы оценки эффективности и результативности асу // Решетневские чтения. – 2013. – С. 164–165.

*Статья поступила в редакцию 06.02.2018*

*Статья принята к публикации 15.03.2018*

УДК 512.55

## ПРИМЕНЕНИЕ АДАПТИВНОГО АЛГОРИТМА ЭЛЛИпсоИДОВ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЗАПРЕТОВ БУЛЕВЫХ И К-ЗНАЧНЫХ ФУНКЦИЙ

© 2018

**Лапиков Игорь Игоревич**, сотрудник лаборатории НКО «ФСРБИТ»

*НКО «Фонд содействия развитию безопасных информационных технологий»*

*(127287, г. Москва, проезд Старый Петровско-Разумовский, 1/23 стр. 1, e-mail: lapikov.i.i@yandex.ru)*

**Никонов Владимир Глебович**, доктор технических наук, профессор, член президиума РАЕН

*Российская академия естественных наук*

*(119002, г. Москва Сивцев Вражек пер., 29/16)*

**Никонов Николай Владимирович**, кандидат физико-математических наук, доцент, сотрудник

*ФУМО ВО Информационная безопасность*

*(119454, г. Москва, проспект Вернадского, д. 78, e-mail: nikonovu@yandex.ru)*

**Аннотация.** В статье рассмотрены практические аспекты применения адаптивного алгоритма, основанного на методе эллипсоидов Хачияна, для проверки совместности систем  $k$ -значных уравнений сдвигового типа, применяемых в схемах защиты информации с использованием фильтрующих генераторов. Важную роль при изучении таких узлов играют понятия запрета и полузапрета функции усложнения. Для определения принадлежности комбинации знаков выходной последовательности, вырабатываемой фильтрующим генератором, к обозначенным классам используется полиэдральный метод, сводящий исходную задачу к системе линейных неравенств с дискретными неизвестными. Её решение, если рассматриваемая комбинация – полузапрет, или доказательство несовместности, если комбинация – запрет осуществляется адаптивным алгоритмом эллипсоидов. Изложенные теоретические положения проиллюстрированы на примерах.

**Ключевые слова:** метод эллипсоидов, адаптивный алгоритм эллипсоидов, фильтрующий генератор, функции  $k$ -значной логики, запрет, полузапрет.

## THE ELLIPSOIDS ADAPTIVE ALGORITHM APPLICATION FOR THE BOOLEAN AND K-VALUED FUNCTIONS TABOO AND SEMITABOO RESEARCH

© 2018

**Lapikov Igor Igorevich**, employee of NPO «FSTRBIT»

*NPO «FSTRBIT»*

*(127287, Moscow, Stary Petrovsko-Razumovsky proezd, 1/23, building 1, e-mail: lapikov.i.i@yandex.ru)*

**Nikonov Vladimir Glebovich**, Doctor of Technology, Professor, Member of the Presidium of the Russian Academy of Natural Sciences

*Russian Academy of Natural Sciences*

*(119002, Moscow, Sivtsev Vrazhek proezd, 29/16)*

**Nikonov Nikolay Vladimirovich**, Ph.D. in Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor, employee of FEMA HE IS

*Federal Educational-Methodical Association in the System of Higher Education "Information Security"*

*(119454, Moscow, Vernadsky prospect, 78, e-mail: nikonovu@yandex.ru)*

**Abstract.** The article considers practical aspects of adaptive algorithm based on Hachiyana's ellipsoids method application to check the solvability of  $k$ -valued shear type equation systems, which is used in the schemes of information protection, using filter generators. An important role in the study of such nodes plays the concepts of filter taboo and filter semitaboo. A polyhedral method is used for produced by a filter generator output sequence characters combinations identification to the designated classes. This reduces the original problem to the system of linear inequalities with discrete unknowns. The solution is as following: if the combination is filter semitaboo, or proof of incompatibility, if the combination is filter taboo, they are carried out by ellipsoids adaptive algorithm. The theoretical positions are illustrated by examples.

**Keywords:** ellipsoids method, ellipsoids adaptive algorithm, filter generator,  $k$ -valued logic functions, filter taboo, filter semitaboo

Один из подходов к анализу и решению систем дискретных, в частности булевых, систем уравнений основан на сведении их к системам линейных неравенств в действительной области. Развитие этого подхода привело к формированию самостоятельного псевдобулевого направления в дискретной математике [1-3], которое применительно к использованию систем линейных неравенств привело к построению так называемого метода разделяющих плоскостей, или полиэдрального метода. Данный метод включает сведение

исходных дискретных уравнений к равносильным относительно дискретных решений системам линейных неравенств в действительной области, которые решаются известным или специально построенным алгоритмом. Преимуществом данного подхода является возможность подключения к решению сложных и трудноформализуемых задач дискретной математики хорошо разработанного аппарата математики в действительной области, например, методов линейного программирования, направленного поиска и дискретной

оптимизации, а также сравнительно новых алгоритмов, обладающих полиномиальной сложностью. К числу последних следует отнести, прежде всего, метод эллипсоидов, предложенный Л.Г. Хачияном [8], на базе которого разработан адаптивный алгоритм, рассматриваемый в данной статье применительно к решению одной из актуальных задач современной дискретной математики – проверки совместности систем уравнений сдвигового типа

$$\begin{cases} f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \gamma_1, \\ f(x_2, x_3, \dots, x_{n+1}) = \gamma_2, \\ \dots \\ f(x_N, x_{N+1}, \dots, x_{N+n-1}) = \gamma_N, \end{cases} \quad (1)$$

где  $x_i, \gamma_i \in \{0, 1, 2, \dots, k-1\}$ ,  $f$  – функция  $k$ -значной логики ( $k \geq 2$ ).

Интерес к изучению систем вида (1) вызван использованием в схемах защиты информации фильтрующих генераторов [15] с функцией усложнения  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  (рисунок 1).

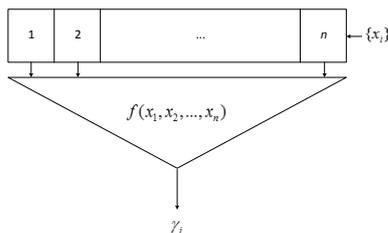


Рисунок 1 – Фильтрующий генератор с функцией усложнения  $f$

Важную роль при изучении таких узлов играет понятие запрета функции  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  – последовательности знаков

$$\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_N, \quad (2)$$

которая не может быть выработана фильтрующим генератором ни при какой входной последовательности  $\{x_i\}$ , или, с алгебраической точки зрения, при которой система (1) – несовместна [4, 11, 12]. В большинстве работ изучались запреты именно булевых функций, однако значительная часть полученных для двоичного случая результатов без существенных изменений переносится и в  $k$ -значную область [5].

Другим важным понятием стало понятие полузапрета [4], как комбинации выходных знаков, позволяющей применительно к булевой области однозначно находить одно или несколько значений входных неизвестных

$$\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_N / x_i = \varepsilon_i, i \in \{1, \dots, N+n-1\}, \varepsilon_i \in \{0, 1, 2, \dots, k-1\}. \quad (3)$$

При переходе в  $k$ -значную область выходная последовательность, позволяющая однозначно находить одно или несколько неизвестных, получила название полузапрета I рода, а полузапретом II рода названа

выходная последовательность, при которой некоторые входные переменные нетривиально локализируются [4]

$$\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_N / x_i \in \Omega_i \subset \{0, 1, 2, \dots, k-1\}. \quad (4)$$

И запреты, и полузапреты имеют непосредственные практические приложения, так как с помощью запретов можно отбраковывать ложные варианты строения систем (1), а с помощью полузапретов осуществлять определять или локализовывать отдельные неизвестные без решения системы (1) [4,7].

Несмотря на то, что в этой области получены серьезные результаты, тем не менее установлено, что сама по себе проблема поиска запретных (2) и полузапретных (3) или (4) комбинаций, а также доказательство факта, что они таковыми являются, представляет собой сложную задачу дискретной математики.

Один из подходов к ее решению основывается на применении упомянутого метода разделяющих плоскостей. Такой прием включает построение для каждого уравнения системы (1) равносильного неравенства, формирование итоговой системы неравенств, равносильной системе (1) в целом

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + \dots + a_{1n}x_{N+n-1} \leq b_1, \\ \dots \\ a_{m1}x_1 + \dots + a_{mn}x_{N+n-1} \leq b_m, \end{cases} \quad (5)$$

и исследование строения области ее решений, образующей вместе с естественными ограничениями

$$\{0 \leq x_j \leq k-1\}, j = \overline{1, n}, \quad (6)$$

некоторый многогранник решений  $P$ .

Очевидно, что если многогранник решений в действительной области пуст  $P = \emptyset$ , то система (1) не имеет и  $k$ -значных решений, следовательно, соответствующая комбинация вида (2) – запрет. Возможен и другой вариант, когда многогранник  $P$  содержит действительные решения, но не содержит целочисленных, что также доказывает наличие запрета. Из особенности расположения многогранника  $P$  в  $n$ -мерной  $k$ -звенной решетке  $V_k^n$  можно сделать вывод и о наличии полузапрета I или II рода.

Во всяком случае, переход от исходной, как правило, сложной системы дискретных уравнений (1) к равносильной системе линейных неравенств (5) дает принципиально новый математический аппарат анализа. Развитие этого математического аппарата, построение алгоритмов решения систем линейных неравенств стимулировалось интересами различных прикладных областей, включая экономику с известными задачами линейного программирования, моделирование технических процессов с привлечением методов дискретной оптимизации, а также генетику, бионику и другие сферы.

Для решения систем неравенств в центре внимания оказались такие алгоритмы, как алгоритма Балаша, симплекс-метод, генетические алгоритмы, которые несмотря на высокую эффективность применительно

к широким классам конкретных задач тем не менее общих оценок сложности, отличных от сложности тотального перебора, не имеют.

В 1978 году Л.Г. Хачияном был предложен алгоритм решения систем линейных неравенств вида (1), но не с дискретными, а с действительными неизвестными, полиномиальная сложность которого доказана в [8].

В данной статье рассматривается и иллюстрируется на примерах возможность применения основанного на методе эллипсоидов Хачияна, адаптивного алгоритма для изучения запретов и полузапретов булевых и  $k$ -значных функций.

Доказательство того, что комбинация (2) является запретом, может быть непосредственно сведено к применению адаптивного алгоритма при условии, что у системы линейных неравенств (5) многогранник решений пуст  $f(x_1, \dots, x_n) = 0$ . В этом случае система (5) – несовместна и адаптивный алгоритм выявит этот факт за  $j = 6(N + n - 1)^2 L$  шагов при условии, что  $\theta(x_j) \geq 2^{-L+1}$ , где  $\theta(x_j) = \max_{i=1, \dots, m} \{A_i^T x_j - b_i\}$ ,  $A_i$  – строка

системы неравенств, а  $L$  – объем входа задачи или число бит, необходимое для записи системы (5) [8].

Отметим, что применение метода разделяющих плоскостей для изучения запретов позволило строить целые семейства  $k$ -значных функций с запретами и полузапретами I и II рода с помощью метода растяжения. Этот метод, предложенный в работе [5], основан на том, что если многогранник решений  $P$  системы линейных неравенств (5) пуст, то линейное преобразование растяжений (или сжатия) приведет к новой системе неравенств, также не имеющей решений. Преобразование растяжения позволит таким образом на базе найденного запрета при одном значении  $k_0$  генерировать  $k$ -значные функции для  $k > k_0$ , задание которых приводит к формированию отрезка выходных значений (2), порождающего многогранник решений  $P'$ , получающийся из исходного многогранника  $P$  действием указанного линейного преобразования.

Если же многогранник  $P$  – не пуст, но не имеет целочисленных решений, то преобразование растяжения может либо обогатить получившуюся систему целочисленными решениями, формируя из исходного запрета полузапрет, либо сохранить условие отсутствия целочисленных решений, то есть привести к запрету. В этом случае последствие действия преобразования растяжения с увеличением  $k$  требует дополнительного исследования, сводящегося также к анализу соответствующего многогранника решений [7].

Остановимся более детально на реализации метода растяжения. Отметим, что система неравенств, задающая многогранник решений  $P$  в булевом случае формируется из двух исходных подсистем, равносильных уравнениям  $f(x_1, \dots, x_n) = 1$  и  $f(x_1, \dots, x_n) = 0$ :

$$f(x_1, \dots, x_n) = 1 \Leftrightarrow \begin{cases} a_{11}^{(1)} x_1 + \dots + a_{1n}^{(1)} x_n \leq b_1^{(1)}, \\ \dots \\ a_{h_1 1}^{(1)} x_1 + \dots + a_{h_1 n}^{(1)} x_n \leq b_{h_1}^{(1)}. \end{cases} \quad (7)$$

$$f(x_1, \dots, x_n) = 0 \Leftrightarrow \begin{cases} a_{11}^{(0)} x_1 + \dots + a_{1n}^{(0)} x_n \leq b_1^{(0)}, \\ \dots \\ a_{h_0 1}^{(0)} x_1 + \dots + a_{h_0 n}^{(0)} x_n \leq b_{h_0}^{(0)}. \end{cases} \quad (8)$$

Из соображений снижения емкостной и временной сложности последующих алгоритмических действий системы (7) и (8) желательно строить минимальными по числу неравенств. Построение таких минимальных систем представляет собой самостоятельную достаточно сложную задачу, рассмотрению которой был посвящен целый ряд работ [6,9,13,14]. В этих работах было введено понятие пороговой структуры булевой функции  $f(x_1, \dots, x_n)$  как пары минимальных значений  $(h_1, h_0)$  и построены минимальные системы для всех булевых функций от  $n \leq 4$  переменных [14].

Далее, на основании фиксированного отрезка знаков выходной последовательности (2) формируется равносильная система неравенств по следующему правилу: если знак  $\gamma_v = 1$ , то порождаемое этим знаком уравнение  $f(x_v, x_{v+1}, \dots, x_{v+n-1}) = 1$  заменяется на систему неравенств (7) с подстановкой вместо переменных  $x_1, \dots, x_n$  текущих переменных  $x_v, x_{v+1}, \dots, x_{v+n-1}$ , а при  $\gamma_\mu = 0$  соответствующее уравнение  $f(x_\mu, x_{\mu+1}, \dots, x_{\mu+n-1}) = 0$  заменяется на систему (8) с подстановкой переменных  $x_\mu, x_{\mu+1}, \dots, x_{\mu+n-1}$ .

Операция растяжения основывается на действии линейного преобразования

$$y_i = (k - 1)x_i, i = \overline{1, N + n - 1}, k \geq 3 \quad (9)$$

на исходные подсистемы (7) и (8), что приводит к формированию условий, налагаемых уже на  $k$ -значную функцию  $f^k(x_1, \dots, x_n)$ , точнее на два ее значения  $\alpha$  и  $\beta$ :

$$f^k(x_1, \dots, x_n) = \alpha \Leftrightarrow \begin{cases} a_{11}^{(1)} y_1 + \dots + a_{1n}^{(1)} y_n \leq b_1^{(1)}(k - 1), \\ \dots \\ a_{h_1 1}^{(1)} y_1 + \dots + a_{h_1 n}^{(1)} y_n \leq b_{h_1}^{(1)}(k - 1). \end{cases} \quad (10)$$

$$f^k(x_1, \dots, x_n) = \beta \Leftrightarrow \begin{cases} a_{11}^{(0)} y_1 + \dots + a_{1n}^{(0)} y_n \leq b_1^{(0)}(k - 1), \\ \dots \\ a_{h_0 1}^{(0)} y_1 + \dots + a_{h_0 n}^{(0)} y_n \leq b_{h_0}^{(0)}(k - 1). \end{cases} \quad (11)$$

Далее, переходя целиком к  $k$ -значному случаю для отрезка знаков

$$\gamma'_1, \gamma'_2, \dots, \gamma'_N, \quad \text{где } \gamma'_j \in \{\alpha, \beta\} \quad (12)$$

на базе подсистем (10) и (11) формируем итоговую систему неравенств, порождаемую отрезком (12)

$$\begin{cases} a_{11}y_1 + \dots + a_{1n}y_{N+n-1} \leq b_1(k-1), \\ \dots \\ a_{\mu 1}y_1 + \dots + a_{\mu n}y_{N+n-1} \leq b_{\mu}(k-1), \end{cases} \quad (13)$$

которая и задает многогранник решений  $P'$  в области определения  $k$ -значной функции  $f^k(x_1, \dots, x_n)$  –  $n$ -мерной  $k$ -звенной решетке  $V_k^n$ .

Приведенные ниже примеры, помимо демонстрации эффективности применения адаптивного алгоритма [10], основанного на методе эллипсоидов Хачияна при изучении запретов и полузапретов, иллюстрируют и применение метода растяжения.

Напомним, что основная идея адаптивного алгоритма состоит в последовательном построении эллипсоидов убывающего объема  $E_j$ , задаваемых парой  $(x_j, B_j)$ , где  $x_j \in \square$  – центр эллипсоида, а  $B_j$  – вещественная матрица, задающая эллипсоид. Начальной локализацией области поиска решений выбирается шар радиуса  $R = \left( \frac{(k-1)\sqrt{N+n-1}}{2} \right) \left( 1 + \frac{1}{16(N+n-1)^2} \right)$  с центром в точке  $x_0 \left( \frac{k-1}{2}, \dots, \frac{k-1}{2} \right)$ , где  $k$  – значность логики. В работе [8] показано, что определитель матрицы  $B_j$  характеризует объем задаваемого ей эллипсоида  $|\det B_j| \square mes(E_j)$ . Из логики алгоритма Хачияна вытекает, что если

$$|\det B_j| \leq d \quad (14)$$

для некоторого  $d$  и невязка  $\theta(x_k) \geq 2^{-L+1}$ , то система несовместна. Специфика рассматриваемой задачи, когда ведется поиск  $k$ -значного решения, делает критерий несовместности системы на основании (14) предпочтительным в сравнении с предложенным Хачияном [8] критерием несовместности по невязке системы. Эмпирическим путем установлено, что для рассматриваемых ниже задач параметр  $d$  имеет порядок  $10^{-9}$ . Использование критерия (14) позволяет существенно уменьшить максимальное количество итераций, которое в работе Л.Г. Хачияна [8] равно  $6(N+n-1)^2 L$ , где  $N+n-1$  – количество неизвестных, а  $L$  – длина входа системы неравенств. В качестве дополнительного критерия выхода из алгоритма по сравнению с классическим используются критерий выхода по пороговому значению невязки системы в центре эллипсоида текущей итерации  $\theta(x_i) \leq 0$ .

Обратимся к иллюстрации изложенного на примерах, в которых будут рассмотрены так называемые обобщенные запреты [7], зависящие от расстояний

между ячейками регистра длины  $r$ , с которых поступает информация на функцию  $f^k(x_1, x_2, \dots, x_n)$  (рисунк 2).

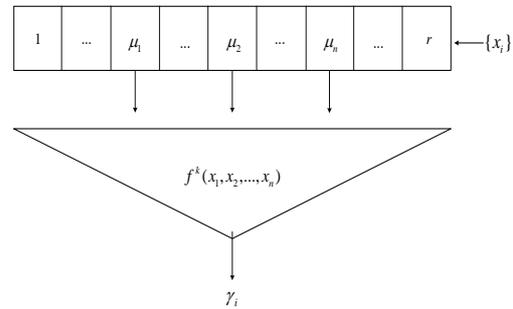


Рисунок 2 – Фильтрующий генератор, построенный на базе регистра длины  $r \geq n$  с переменными  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , поступающими на функцию  $f$  с ячейек с номерами  $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$

**Пример 1.** Рассмотрим систему булевых уравнений сдвигового типа, порождаемую фильтрующим генератором (рисунок 1) и мажоритарной функцией  $f(x_1, x_2, x_3) = x_1x_2 \oplus x_1x_3 \oplus x_2x_3$ , которая задается неравенствами

$$f(x_1, x_2, x_3) = 0 \Rightarrow x_1 + x_2 + x_3 \leq 1,$$

$$f(x_1, x_2, x_3) = 1 \Rightarrow x_1 + x_2 + x_3 \geq 2,$$

при условии, что расстояние между ячейками регистра, с которых снимается информация на переменные  $x_1$  и  $x_2$  равно  $l_1 = \mu_2 - \mu_1$ , а между  $x_2$  и  $x_3$  равно  $l_2 = \mu_3 - \mu_2$  (рисунок 3).

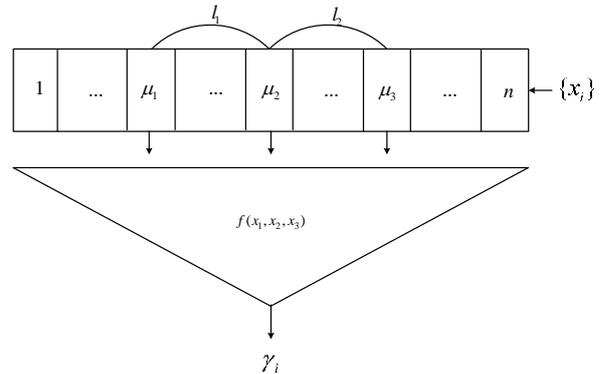


Рисунок 3 – Регистр сдвига с функцией усложнения  $f(x_1, x_2, x_3)$ .

Рассмотрим последовательность выходных знаков, расположенных на расстояниях  $l_1$  и  $l_2$  вида

$$\begin{array}{cccccccc} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ \underbrace{\hspace{1.5cm}}_{l_1} & \underbrace{\hspace{1.5cm}}_{l_2} & \underbrace{\hspace{1.5cm}}_{l_1} & \underbrace{\hspace{1.5cm}}_{l_2} & \underbrace{\hspace{1.5cm}}_{l_1} & \underbrace{\hspace{1.5cm}}_{l_2} & \end{array} \quad (15)$$

которая приведет к системе неравенств

$$\begin{cases} x_1 + x_2 + x_3 \geq 2, \\ x_2 + x_4 + x_5 \leq 1, \\ x_3 + x_5 + x_6 \leq 1, \\ x_5 + x_7 + x_8 \geq 2, \\ x_6 + x_8 + x_{10} \leq 1, \\ x_8 + x_9 + x_{11} \leq 1, \\ x_{10} + x_{11} + x_{12} \geq 2. \end{cases} \quad (16)$$

Систему (16) дополним двусторонними ограничениями  $0 \leq x_i \leq 1, i = 1, 12$  и применим для ее решения адаптивный алгоритм и исходный алгоритм Хачияна.

В результате работы алгоритмов установлено, что при входе  $L = 75, n = 12$  алгоритм Хачияна объявил о несовместности системы (16) через 64800 шагов, а адаптивный алгоритм эллипсоидов – через 65 итерации. Отсюда, очевидно, следует, что последовательность (15) – обобщенный запрет.

Целевой поиск комбинаций знаков (16), являющейся обобщенным запретом, может осуществляться путем направленного перебора с тестированием варианта адаптивным алгоритмом, основанным на методе эллипсоидов Хачияна, который на разобранных примерах работает с очень высоким быстродействием.

**Пример 2.** В данном примере проиллюстрируем применение метода растяжения, при котором от двоичной логики перейдем к  $2^5 = 32$ -значной, осуществив растяжение по осям  $x_1, x_2, x_3$  в 32 раза. Формально рассмотрим схему из предыдущего примера (рисунок 4) с 32-значной функцией  $f^{32}(x_1, x_2, x_3)$  при  $n = 12$ , которая удовлетворяет условию

$$\begin{aligned} f^{32}(x_1, x_2, x_3) = \alpha &\Rightarrow x_1 + x_2 + x_3 \leq 31, \\ f^{32}(x_1, x_2, x_3) = \beta &\Rightarrow x_1 + x_2 + x_3 \geq 62. \end{aligned}$$

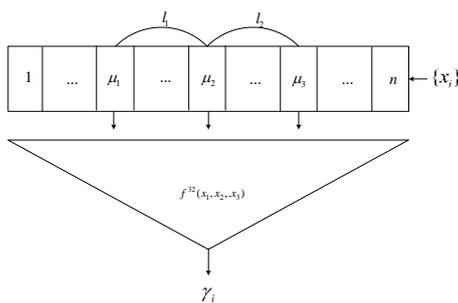


Рисунок 4 – Регистр сдвига с 32-значной функцией усложнения  $f^{32}(x_1, x_2, x_3)$

Положим расстояния между съемами на переменные  $x_1, x_2, x_3$  равными, по-прежнему  $l_1$  и  $l_2$ . Выделим последовательность знаков вида

$$\beta \alpha \alpha \beta \alpha \alpha \beta, \quad (17)$$

$l_1 \quad l_2 \quad l_1 \quad l_2 \quad l_1 \quad l_2$

которая приведет к системе неравенств

$$\begin{cases} x_1 + x_2 + x_3 \geq 62, \\ x_2 + x_4 + x_5 \leq 31, \\ x_3 + x_5 + x_6 \leq 31, \\ x_5 + x_7 + x_8 \geq 62, \\ x_6 + x_8 + x_{10} \leq 31, \\ x_8 + x_9 + x_{11} \leq 31, \\ x_{10} + x_{11} + x_{12} \geq 62, \end{cases} \quad (18)$$

где  $x \in \{0, \dots, 31\}$ .

Несмотря на увеличение значения  $k$  адаптивный алгоритм эллипсоидов при входе  $L = 152$  за 1192 итераций, а алгоритм Хачияна за 131328 шагов доказывает несовместность системы (18) и тот факт, что (17) – обобщенный запрет функции  $f^{32}(x_1, x_2, x_3)$ . Заметим, что число необходимых итераций в этом случае оказалось приблизительно в 1,6 раза большим, чем для первого, так как это число линейно зависит от входа  $L$  системы и почти не зависит от  $k$ .

Как уже отмечалось, метод растяжения может использоваться и при изучении полузапретов, что можно проиллюстрировать на примере 3, базирующемся на примере 1, но при нечетном  $k = 3$ .

**Пример 3.** Рассмотрим схему из примера 1, а значность логики положим равной 3, а на функцию  $f^3(x_1, x_2, x_3)$  наложим ограничения:

$$\begin{aligned} f^3(x_1, x_2, x_3) = 0 &\Rightarrow x_1 + x_2 + x_3 \leq 2, \\ f^3(x_1, x_2, x_3) = 2 &\Rightarrow x_1 + x_2 + x_3 \geq 4. \end{aligned}$$

Последовательность выходных знаков

$$\begin{array}{cccccc} 2 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 2 \\ \underbrace{\hspace{1.5cm}} & \underbrace{\hspace{1.5cm}} & \underbrace{\hspace{1.5cm}} & \underbrace{\hspace{1.5cm}} & \underbrace{\hspace{1.5cm}} & \underbrace{\hspace{1.5cm}} & \underbrace{\hspace{1.5cm}} \\ l_1 & l_2 & l_1 & l_2 & l_1 & l_2 & \end{array} \quad (19)$$

порождает систему линейных неравенств

$$\begin{cases} x_1 + x_2 + x_3 \geq 4, \\ x_2 + x_4 + x_5 \leq 2, \\ x_3 + x_5 + x_6 \leq 2, \\ x_5 + x_7 + x_8 \geq 4, \\ x_6 + x_8 + x_{10} \leq 2, \\ x_8 + x_9 + x_{11} \leq 2, \\ x_{10} + x_{11} + x_{12} \geq 4. \end{cases} \quad (20)$$

Решение системы (20) адаптивным алгоритмом, найденное всего за 35 итераций (что меньше, чем в предыдущих примерах) привело к следующему результату:

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$	$x_{11}$	$x_{12}$
1.9	1.0	1.2	0.1	0.8	-	2.3	0.8	0.1	1.2	1.0	1.9
				1	0.3						

Округление полученного результата до целых значений приводит к истинному ответу в 3-значной логике.

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$	$x_{11}$	$x_{12}$
2	1	1	0	1	0	2	1	1	1	1	2

Проверка показывает, что система (20) действительно однозначно разрешима относительно неизвестных в 3-значной логике и комбинация (19) – полузапрет функции I рода.

Проведенные эксперименты показывают потенциальную высокую эффективность алгоритма Хачияна при анализе систем уравнений сдвигового типа методом разделяющих плоскостей.

В заключение отметим, что сведение систем уравнений сдвигового типа к системам линейных неравенств позволило с новых позиций оценить проблему изучения запретов и полузапретов дискретных функций. Такое сведение повышает актуальность применения известных и разработку новых алгоритмов проверки совместности и нахождения дискретных решений систем линейных неравенств, в частности, рассмотренного в статье адаптивного алгоритма, развивающего идеи метода эллипсоидов Хачияна. Если для нахождения дискретных решений систем линейных неравенств в принципе могут быть использованы различные эвристические методы, то при доказательстве несовместности именно адаптивный алгоритм представляется, по-видимому, единственным, применимым для решения этой задачи с заведомо определенной оценкой сложности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Балакин Г.В., Никонов В. Г. Методы сведения булевых уравнений к системам пороговых соотношений // ТВП., 1994, т. 1, вып. 3, С. 389–401.
2. Балакин Г.В., Никонов В. Г. Псевдобулево направление в дискретной математике // ОПиПМ, 2012. Т. 19, в. 6.
3. Балакин Г.В., Никонов В.Г. Псевдобулевы решения систем нелинейных булевых уравнений // Обзорение прикладной и промышленной математики. 2014, т. 21, вып. 4, С. 1–4.
4. Никонов В.Г., Никонов Н.В. Запреты k-значных функций и их связь с проблемой разрешимости систем уравнений специального вида // Вестник РУДН, 2003. Серия прикладная и компьютерная математика. Т.2, №1. С. 78–93.
5. Никонов Н.В. Метод растяжения в построении классов равновероятных значных функций с запретом // ОПиПМ, 2006. Т.13. Вып. 6. С. 961–974.
6. Никонов В.Г., Никонов Н.В. Особенности пороговых представлений k-значных функций // Труды по дискретной математике. 2009, вып. 11, №С. 60–85.
7. Никонов Н.В. Полиэдральные классы функций k-значной логики с обобщенными запретами и полузапретами // Ж. Математические вопросы криптографии. М.: РАН, АКРФ, 2012. Т.3. Вып.1. С. 54–68.

8. Хачиян Л.Г. Полиномиальные алгоритмы в линейном программировании / ЖВМиМФ. 1980, Т.20, №1, С. 51–68.

9. Никонов В.Г. Пороговые представления булевых функций // Обзорение прикладной и промышленной математики. 1994. вып. 1, №3, С. 402–457.

10. Лапиков И.И., Никонов В.Г. Адаптивный алгоритм решения систем линейных неравенств с k-значными неизвестными // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского, 2016, №650, С. 88–94.

11. Логачев О.А., Сальников А.А., Смышляев С.В., Ященко В.В. Булевы функции в теории кодирования и криптологии. М.: Ленанд, 2015. 576 с.

12. Сумароков С.Н. Запреты двоичных булевых функций и обратимость для одного класса кодирующих устройств // Обзорение прикладной и промышленной математики. 1994. Т.1. Вып.1. С.33–55.

13. Никонов В.Г. Покрывтия булевых графов // Дискретная математика, 1994, вып. 6, №3, С. 21–34.

14. Никонов В. Г. Классификация минимальных базисных представлений всех булевых функций от четырех переменных //Обзорение прикл. промышл. матем., 1994, т. 1, вып. 3, С. 458–545.

15. Фомичев В.М. Дискретная математика и криптология. Курс лекций / под общ. ред. Д-ра физ-мат н. Н.Д. Подуфалова. М.: Диалог-МИФИ, 2003. 400 с.

*Статья поступила в редакцию 04.02.2018*

*Статья принята к публикации 15.03.2018*

УДК 510.22

## ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНИВАНИЯ ПРЕДПОЧТЕНИЙ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ СТОХАСТИЧЕСКИХ И НЕЧЕТКИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ

© 2018

**Рыжаков Михаил Викторович**, старший преподаватель, заведующий лабораторией  
прикладных нанотехнологий

*Московский физико-технический институт (государственный университет)*  
(141700, Россия, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9, e-mail:  
mryzhakov@applmech.mipt.ru)

**Рыжаков Виктор Васильевич**, доктор технических наук, профессор кафедры  
«Техническое управление качеством»

*Пензенский государственный технологический университет*  
(440039, Россия, г. Пенза, пр. Байдукова/ ул. Гагарина, 1а/11, e-mail: rvv@penzgtu.ru)

**Портнова Ирина Михайловна**, кандидат технических наук, заместитель главного бухгалтера  
*Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Рубин»*  
(440000, Россия, г. Пенза, ул. Байдукова, 2)

**Аннотация** Отмечены публикации, касающиеся сфер использования сетевых технологий. Что позволило указать особенности возможных подходов к оцениванию предпочтений сетей. В связи с этим рассмотрены особенности оценивания предпочтений сетей на основе использования стохастических квалиметрических оценок, как степени их функционального соответствия, с формализацией комплексных оценок алгоритмами, учитывающими значения и значимость параметров предпочтений. При этом подробно рассмотрены переход от абсолютных значений единичных показателей качества сетей к относительным значениям с использованием виртуальных эталонов и предложен алгоритм нахождения комплексной оценки предпочтения, в котором учитываются весовые коэффициенты значимости единичных показателей.

Также рассмотрены особенности оценивания предпочтений сетей на основе нечеткой информации, представленной в виде нечетких ситуаций, которые основаны на учете функций принадлежности нечетких множеств – термов, представляющих собой элементы условных шкал, построенных на базовых множествах нечетких значений параметров сети. Информация с этих шкал используется при комплексном оценивании предпочтения сетей. Для этого получены алгоритмические выражения оценок предпочтений в виде нечетких включений (равенств).

**Ключевые слова:** сетевая технология, квалиметрия, качество, нечеткие ситуации, включения, равенства.

## PECULIARITIES OF ESTIMATING THE PREFERENCES OF NETWORKS BASED ON STOCHASTIC AND FUZZY REPRESENTATIONS

© 2018

**Ryzhakov Mikhail Viktorovich**, Senior Lecturer, Head of Laboratory for Engineering Nanotechnologies  
*Moscow Institute of Physics and Technology (State University)*

(141700, Russia, Moscow Region, Dolgoprudny, Institute TRANS., 9, e-mail: mryzhakov@applmech.mipt.ru)

**Ryzhakov Viktor Vasilievich**, Doctor of Technical Sciences, Professor of Engineering Quality Control Department  
*Penza State Technological University*

(440039, Russia, Penza, Baydukov proezd/Gagarin ul., 1a/11, e-mail: rvv@penzgtu.ru)

**Portnova Irina Mikhailovna**, Candidate of Technical Sciences, Deputy Accounting Manager  
*Joint-stock company «Scientific and Production Enterprise «Rubin»*  
(440039, Russia, Penza, Baydukov proezd, 2)

**Annotation.** The publications concerning the use of network-centric technologies are noted. That allows to indicate the features of possible approaches to assessing network preferences. In this regard, the features of estimating network preferences based on the use of stochastic quasimetric estimates, as the degree of their functional correspondence, and the formalization of complex estimates by algorithms that take into account the values and significance of the preferences parameters are considered. At the same time, the transition from the absolute values of individual network quality indicators to relative values using virtual standards and the algorithm for finding a complex preference estimate in which the weight coefficients of the significance of single indicators are taken into account are considered in detail.

Also, the features of estimating the preferences of networks based on fuzzy information are shown, which are presented in the form of fuzzy situations, which are based on taking into account the membership functions of fuzzy set-terms, which are elements of conditional scales based on basic sets of fuzzy values of network parameters. Information from these scales is used for a comprehensive assessment of network preferences. For this, algorithmic expressions for estimating preferences in the form of fuzzy inclusions (equalities) are obtained.

**Keywords:** network-centric technology, qualimetry, quality, fuzzy situations, inclusions, equality

В связи с тем, что объекты сетевых технологий – крупномасштабные сети, и области их приложений весьма разнообразны (промышленность [1,2], экономика и государственное управление [3], экология [4], военное дело [5] и квалиметрия, обобщающая все свойства объектов сетей [6]), поэтому их управление сопряжено с необходимостью изучения и преобразования больших объемов разнообразной информации, имеющей различный характер. К их числу можно отнести различный характер информации: детерминированный (который на практике – гипотетическое явление и его рассмотрение нецелесообразно), стохастический и нечеткий. Это разнообразие приводит к разработке различных подходов для оценивания предпочтений указанных объектов. Если допустить, что предпочтение сети можно понимать как степень её функционального соответствия – качество, то один из подходов оценивания предпочтений – квалиметрический. Тогда его реализация может быть представлена набором различных алгоритмов оценивания указанной степени соответствия, которая, в свою очередь, согласно [7] будет являться оценкой качества сети.

При стохастическом характере исходной информации о параметрах сети для оценивания её предпочтения можно воспользоваться положениями квалиметрии, реализованной также на основе стохастических представлений [8]. Наиболее существенными особенностями этого подхода являются необходимость синтеза виртуального эталона сети и выбор алгоритма комплексного оценивания качества сети и выбора тенденции роста веса параметров сети при их ранжировке, отвечающей определенной (требуемой) семантике сети.

При реализации такого подхода виртуальный эталон в рассмотренном подходе будет играть роль системы единиц величин, характеризующих исследуемую сеть. Основные положения методики его синтеза можно найти в [8]. Отметим наиболее существенные её моменты: 1. Значения позитивных параметров (их рост соответствует росту качества сети, а уменьшение – снижению качества) должны задаваться с определенным завышением, т.е. должны стимулировать совершенствование сети; 2. Значения негативных параметров (их рост соответствует снижению качества сети) следует заменять обратными значениями. Например, погрешность  $\gamma(y)$  результата измерения параметра  $(y)$  можно заменить на точность – число различных градаций

$$N = 1/2\gamma(y);$$

3. Выбор из известного набора аналитических выражений возможных тенденций роста веса параметров сети тенденции, отвечающей семантике решаемой задачи, как например, можно найти в [8].

Второй подход оценивания предпочтений сети реализуется на основе шкалирования и кластеризации при использовании представлений нечетких множеств. Эта особенность требует более специфический аналитический аппарат. Здесь, во-первых, потребуется

иметь утилитарный метод измерения нечеткой информации, который должен включать процедуры шкалирования нечеткой информации путем построения условных шкал (предметных или универсальных) с набором соответствующих функций принадлежности, позволяющих выполнять подробную фаззификацию исходной информации и иметь алгоритмы дефаззификации этой информации; во-вторых, потребуются также, как и в первом подходе, алгоритмы нахождения комплексных оценок предпочтений сетей, отвечающих определенным кластерам, но с дополнением качественно новых свойств, в которых учитывались бы уровни квалификации различных экспертов и ряд других особенностей.

Реализацию первого подхода можно представить алгоритмами комплексной оценки предпочтения – качества сети в виде выборочных средних с наибольшей эффективностью из их числа. Чтобы представить алгоритм аналитически, приведем соответствующую символику, отражающую особенность сети:

$r$  - номер предпочтения сети,  $r \in \{1, 2, \dots, R\}$ ;

$i$  - номер параметра сети,  $i \in \{1, 2, \dots, I\}$ ;

номер эксперта, определяющего значения параметров,  $l \in \{1, 2, \dots, L\}$ . Тогда с учетом этого параметр сети можно представить так

$$\alpha_{ri}^l = \frac{y_{ri}^l}{y_{ri}}, \quad (1)$$

где  $y_{ri}^l$  – значение  $i$ -го параметра  $r$ -го предпочтения, определенного  $l$ -м экспертом на предметной шкале;

$y_{ri}$  – эталонное значение параметра на предметной шкале.

При стохастическом подходе  $y_{ri}^l$  заменяется оценкой  $(\bar{y}_{ri}^l)$ , если имеется выборка  $\{y_{rif}^l\}$ ,  $f$  – номер замера (исходного данного в выборке),  $f \in \{1, 2, \dots, F_i\}$ . С учетом этого

$$\bar{y}_{ri}^l = \frac{1}{F_i} \sum_{f=1}^{F_i} y_{rif}^l. \quad (2)$$

и

$$\bar{\alpha}_{ri}^l = \bar{y}_{ri}^l / y_{ri}, \quad (2a)$$

С учетом (2a) алгоритм комплексного показателя предпочтения можем представить так

$$\bar{Q}_r^l = \sum_{i=1}^I g_i^l \bar{\alpha}_{ri}^l, \quad (3)$$

где  $g_i^l$  – весовой коэффициент значения параметра сети  $\alpha_{ri}^l$ , определенный  $l$ -м экспертом.

Совокупность значений оценок  $\{\bar{Q}_r^l\}$  для предпочтения  $r$  следует обобщить с учетом уровня квалификации всех экспертов  $\{W_0^l\}$ . Это можно выполнить, следуя алгоритму

$$\bar{\bar{Q}}_r = \sum_{l=1}^L g_r^l \cdot \bar{Q}_r^l, \quad (4)$$

где

$$g_r^l = \frac{W^l}{\sum_{l=1}^L W^l} \quad (5)$$

Выполняя процедуры для всех вариантов предпочтений, получим совокупность оценок  $\bar{Q}_r$ . Из их числа выберем  $\bar{Q}_{r_0} - \max$ . Это означает, что предпочтение с номером  $r_0$  наиболее соответствует заданной семантике.

При реализации второго подхода оценивания предпочтений необходимо иметь аппарат (методики) измерения нечеткой информации. В качестве его основой можно использовать способ, выполняемый согласно патенту [9].

В соответствии с [9] необходимо синтезировать условную шкалу (предметную или универсальную), на которой должны быть нанесены типовые представители термов и графики соответствующих функций принадлежности. В качестве аналитических выражений таковых можно использовать для предметной шкалы  $y_{ri}$ - параметра

$$\mu_{\bar{y}_{ri}}(y_{ri}^l) = \exp \left[ \frac{(y_{ri}^l - y_{rij}) |2J_{ri}|^{g_0}}{Y_{ri0}} \cdot \ln t_{incj} \right], \quad (6)$$

где вводится дополнительный индекс  $j$  – номер терма на шкале  $i$ -го параметра предпочтения,  $j \in \{0, 1, \dots, J_i\}$ ;

$Y_{ri0}$  – размах множества возможных значений параметра  $y_{ri}$ ;

$g_0$  – параметр, характеризующий степень нечеткости терма;

$t_{incj}$  – порог нечеткого включения  $j$ -го терма.

При переходе на универсальную шкалу  $y_{ri}^l$  заменяется на  $\alpha$

$$\alpha_{ri}^l = \frac{y_{ri}^l}{Y_{ri0}}, \quad (7)$$

и в (6)  $Y_{ri0}$  заменяется на 1.

При использовании (6) осуществляется фаззификация исходной информации, а последующая дефаззификация может быть выполнена на основе алгоритма

$$\bar{y}_{ri}^l = \frac{\sum_{j=1}^{J_i} \mu_{\bar{y}_{ri}}(y_{ri}^l) \cdot y_{rij}}{\sum_{j=1}^{J_i} \mu_{\bar{y}_{ri}}(y_{ri}^l)} \quad (8)$$

Аналогичен переход на универсальную шкалу.

Таким образом каждый эксперт получит совокупность оценок  $\{y_{ri}^l\}$  по всем параметрам  $i \in \{1, 2, \dots, I_r\}$ . Каждую такую совокупность значений можно считать координатами вектора, который, в свою очередь, с учетом соответствующих функций принадлежности можно считать выражением ситуации  $(\tilde{S}_r)$ , определенной  $l$ -м экспертом.

Если в качестве эталона  $r$ -го предпочтения выбрать эталонную ситуацию  $(\tilde{S}_r^*)$ , то в качестве оценивания степени предпочтения  $\tilde{S}_r$  можно использовать условное отношение или в виде нечеткого включения

$$R(\tilde{S}_r, \tilde{S}_r^*) = v(\tilde{S}_r, \tilde{S}_r^*) \quad (9)$$

или в виде нечеткого равенства

$$R(\tilde{S}_r, \tilde{S}_r^*) = \&_{1,2}(v_1(\tilde{S}_r, \tilde{S}_r^*), v_2(\tilde{S}_r, \tilde{S}_r^*)), \quad (10)$$

где

$$v(\tilde{S}_r, \tilde{S}_r^*) = \&(\mu_{\tilde{S}_r} \rightarrow \mu_{\tilde{S}_r^*});$$

$$v(\tilde{S}_r^*, \tilde{S}_r) = \&(\mu_{\tilde{S}_r^*} \rightarrow \mu_{\tilde{S}_r}).$$

Здесь  $\mu_{\tilde{S}_r}, \mu_{\tilde{S}_r^*}$  – совокупности значений функций принадлежности нечетких значений параметров ситуаций.

Совокупности значений  $\{v(\tilde{S}_r, \tilde{S}_r^*)\}$  или  $\{\mu(\tilde{S}_r, \tilde{S}_r^*)\}$  позволяют выделить кластер ситуаций, отвечающих условию

$$\{v(\tilde{S}_r, \tilde{S}_r^*)\}_k > [v], \quad (11)$$

где  $[v]$  – допустимое значение нечеткого включения, определяющего минимальную степень близости ситуации  $\tilde{S}_r$  к эталонной  $\tilde{S}_r^*$ .

Можно выбрать  $\max v(\tilde{S}_r, \tilde{S}_r^*)$ , что будет определять наиболее адекватный вариант предпочтения, отвечающий требуемой семантике. Все изложенные процедуры можно автоматизировать на основе использования элементов искусственных нейронов на множествах нечетких ситуаций [10,11].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- Трахтенгерц Э.А., Пашенко Ф.Ф. Сетецентрические методы управления в крупномасштабных сетях. М.: ЛЕНА НД, 2016, – 193 с.
- Дроговоз П.А., Иванов П.Д. Перспективы развития бизнес-информатики как междисциплинарного подхода к управлению наукоемкими промышленными предприятиями. Инженерный журнал: наука и инвестиции. 2013, №3. URL: <http://engjournal.ru/catalog/indust/hidden/654.html>
- Савин Л.В., Федорченко С.Н., Шварц О.К. Сетецентрические методы в государственном управлении. М.: ООО «Сам полиграфист», 2015, 146 с.
- Трахтенгерц Э.А. Сетецентрические методы компьютерного противодействия катастрофам и рискам // Информационные технологии в управлении. 2013, №41, С. 162–248.
- Руденский А. Искусственный интеллект в сетецентрических войнах XXI века// Надежная оборона, 2011. №9, С. 50–51.
- Рыжаков В.В., Рыжаков М.В., Рыжаков К.В. Формирование классов качества объектов на основе сетецентрических технологий// научно-технический журнал «Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России». М.: ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас», 2017, №4, С. 33–37.

7. ГОСТ Р ИСО 9000-15. Системы менеджмента качества. Основные понятия и словарь.

8. Рыжаков В.В., Рыжаков М.В., Рыжаков К.В. Прикладная квалиметрия на основе стохастических представлений. Монография. М.: МФТИ, 2016, 93 с.

9. Рыжаков В.В. Рыжаков М.В. Патент РФ на изобретение №2565494 «Способ измерения нечеткой информации». Опубликовано 20.10.2015. Бюллетень №29.

10. Круглов В.В., Дли М.П., Голунов Р.Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. М.: Физматлит. 2001, 224 с.

11. Рыжаков В.В., Рыжаков М.В., Рыжаков К.В. Аналитические положения диагностирования объектов на основе нечеткой информации с использованием искусственных нейронов. М.: МФТИ, 2010, 117 с.

*Статья поступила в редакцию 30.01.2018*

*Статья принята к публикации 14.03.2018*

УДК 621.376.54

## ИНТЕРПОЛИРУЮЩИЕ ШИМ-МОДУЛЯТОРЫ В ТЕХНИКЕ ПЕРЕДАЧИ И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СИГНАЛОВ

© 2018

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

*Пензенский государственный технологический университет*

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

**Аннотация.** Статья посвящена способу повышения точности широтно-импульсных модуляторов сигналов при их передаче и преобразовании. Повышение точности достигается за счет сокращения шага дискретизации времени путем интерполяции опорного периода с помощью кольцевого генератора импульсов. Применение широтно-импульсной модуляции при передаче сигналов по внутреннему интерфейсу позволяет повысить скорость передачи без увеличения разрядности шины за счет увеличения информационной нагрузки сигналов. ШИМ-модуляция в устройствах управления аналоговыми исполнительными органами дает возможность упростить техническую реализацию контроллера, исключив операцию цифро-аналогового преобразования. Рассмотрены варианты структуры и свойства схем ШИМ-модуляторов с фазовой интерполяцией опорного периода на основе цифровых линий задержки и кольцевых генераторов. Предложена схема модулятора, в которой опорный генератор выполнен по кольцевой схеме, множество выходов генератора образует субшкалу отсчета времени. Показано, что схема обеспечивает уменьшение шага дискретизации времени до времени задержки каскада генератора – времени задержки распространения одиночного логического вентиля.

**Ключевые слова:** частота, фаза, кольцевой генератор, модуляция, ширина импульса, фазовая интерполяция.

## THE INTERPOLATING PWM MODULATORS FOR SIGNAL TRANSMISSION AND CONVERSION TECHNIQUE

© 2018

**Chulkov Valery Alexandrovich**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department «Bio-medical Engineering»

*Penza State Technological University*

*(Russia, Penza, Baydukova proezd / Gagarina ul., 1a/11, e-mail: chu@penzgtu.ru)*

**Annotation.** Article is devoted to a way of accuracy increase of pulse-width modulators during signal transmission and conversion. Increase in accuracy is achieved by the time sampling step reducing by means of reference period interpolating using the pulse ring oscillator. Application of pulse-width modulation for signals transmitting via the internal interface allows to increase transfer rate without the bus width extension due to increase in signal information load. PWM modulation in analog control units gives the chance to simplify technical realization of the controller, having excluded operation of digital-to-analog transformation. The structure versions and property of the PWM modulator circuit with the reference period interpolation on the basis of digital delay lines and ring oscillators are considered. A modulator circuit is proposed in which a reference oscillator is made in a ring circuit, a plurality of outputs of the oscillator forms a time counting subscale. It is shown that the circuit provides reduction of a time sampling step reduced to a generator cascade delay – propagation delay time of the single logical gate.

**Key words:** frequency, phase, ring oscillator, modulation, pulse width, phase interpolation.

Производительность цифровых вычислительных устройств сдерживается достижимой тактовой частотой. По этой причине в технике высокоскоростной передачи и преобразования информационных сигналов находит распространение широтно-импульсная модуляция (ШИМ), позволяющая «уложить» в пределы такта несколько битов [1]. Так в высокоскоростных цифровых системах, которые строятся по архитектуре AS-памяти [2], повышение скорости обмена данными обычно достигается увеличением разрядности внутренней шины, что приводит к усложнению межсоединений на плате, увеличению числа выводов микросхем и увеличению площади их кристаллов. Применение ШИМ-модуляции позволяет решить проблему, поскольку одному переходу сигнала соответствует сразу несколько битов информации и, кроме того, восстановление тактовых импульсов из самих сигналов можно осуществить с помощью простейшего устройства PLL (*Phase Lock Loop* – система фазовой синхронизации) с отказом от выделенного канала

ла синхронизации. Другая требующая внимания область применения ШИМ-сигналов – прецизионное управление аналоговыми исполнительными органами импульсами логических микросхем, которое, хотя и осуществляется на низких частотах, требует высокого разрешения по времени.

В настоящем сообщении рассматриваются вопросы реализации ШИМ-модуляторов с применением принципа фазовой интерполяции.

Пример организации внутреннего интерфейса с ШИМ сигналами представлен структурной схемой (рисунок 1). Каждые два бита последовательного кода  $D_{\text{вх}}$  преобразователем ПК<sub>а</sub> в передатчике представляются в параллельном двухразрядном коде, и далее с помощью ШИМ-модулятора – в виде импульсов, ширина которых отображает пару битов (а). Блок PLL<sub>а</sub> задает моменты возможного спада импульсов. Поскольку каждый импульс отражает два бита, передатчик снабжен делителем частоты на два, задающим

скорость передачи битов. В приемнике с помощью  $PLL_b$  производится демодуляция ШИМ-импульсов – определение позиций их спадов внутри периода.

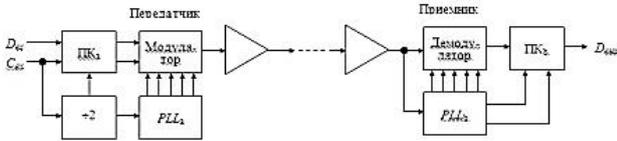


Рисунок 1 – Организация внутреннего ШИМ интерфейса: а – передатчик, б – приемник

Таким образом, и в передатчике, и в приемнике блоки  $PLL$  производят по сути фазовую интерполяцию опорного периода. Задача фазовой интерполяции значительно упрощается, если местные генераторы блоков  $PLL$  выполнить в виде кольцевых генераторов (КГ) [3, 4]. Эффективность ШИМ интерфейса с  $PLL$  на основе КГ оценивается повышением скорости передачи данных, которая составит  $V = N/(2^N + 1)F_o = NF_c$ , где  $\tau_o$  – единичный интервал, определяемый задержкой каскада КГ,  $F_c$  – частота передачи символов. По мере увеличения информационной нагрузки  $N$  символов их частота снижается, при этом возрастают требования к точности синхронизации PLLа.

Широтно-импульсная модуляция находит применение в управлении аналоговыми исполнительными органами, в частности, двигателями постоянного тока, преобразователями постоянного напряжения, светодиодными мониторами, в измерительных генераторах, в цифровых преобразователях мощности, импульсных источниках питания, а также в бесперебойных источниках питания и пр. [5–13]. Для этой цели широко применяются микроконтроллеры, которые для управления нагрузкой должны изменять напряжение от 0 до предела шкалы, что осуществляется путем широтно-импульсной модуляции с использованием эффекта передискретизации, для чего период ШИМ-сигналов выбирается много меньшим времени реакции управляемого объекта. Изменение и точное поддержание управляющего напряжения достигается в ШИМ-контроллере путем регулирования скважности импульсов.

Возможные варианты схем цифровых широтно-импульсных модуляторов с интерполяцией опорного периода представлены на рисунке 2. Модуляторы на основе цифровой линии задержки (ЦЛЗ) в составе системы  $DLL$  (*Delay Lock Loop* – система автоподстройки задержки, в которой ЦЛЗ замкнута обратной связью через фазовый компаратор ФК) (рисунок 2а), либо кольцевого генератора (КГ в виде кольца из звеньев ЦЛЗ) (рисунок 2б) обладают монотонной и близкой к линейной модуляционной характеристикой [13]. В первой схеме период импульсов задается извне от опорного генератора (ОГ), КГ работает в режиме автогенерирования. Выходные импульсы начинаются в начале периода установкой триггера, а завершаются в момент сброса триггера сигналом мультиплексора,

фаза которого внутри опорного периода задается цифровым кодом  $D$ . Технологические отклонения, изменения температуры и питающего напряжения приводят к уходу частоты импульсов, но не отражается на их скважности. При необходимости частоту КГ несложно стабилизировать известными средствами. Как на недостаток этих схем можно указать на громоздкий мультиплексор, выполняющий преобразование  $n$ -разрядного управляющего кода  $D$  в  $2^n$ -разрядный унитарный код, сложность его с повышением разрешения модулятора экспоненциально возрастает.

Для преодоления этого недостатка можно использовать сегментированную структуру ЦЛЗ [14], пример которой показан на рисунке 2в. Здесь модулятор включает пару последовательно включенных ЦЛЗ, одна из которых является «медленной», а вторая – «быстрой», их звенья различаются временами задержки – в «медленной» ЦЛЗ оно в  $2^n$  раз больше, чем в «быстрой», что обеспечивается соответствующим выбором топологических размеров звеньев. Вторая ЦЛЗ может состоять из произвольного числа  $2^m$  звеньев. Управление суммарной задержкой осуществляется с помощью двух мультиплексоров, первый из которых отвечает за выбор отвода ЦЛЗ<sub>1</sub> младшими  $n$  разрядами кода  $D$ , а второй – за выбор отвода ЦЛЗ<sub>2</sub> его старшими разрядами. Чтобы увеличению кодового слова  $D$  соответствовало увеличение скважности ШИМ-импульсов, входы мультиплексора  $MUX_2$  подключены к отводам ЦЛЗ<sub>2</sub> в обратном порядке.

В рабочем режиме разрешающий сигнал замыкает обе последовательно соединенные ЦЛЗ в замкнутый контур, образующий КГ, при этом младшие разряды кода  $D$  задают позицию фронта ШИМ-импульса внутри периода, скважность импульсов пропорциональна полному слову  $D$ . Модуляционная характеристика устройства имеет периодическую нелинейность ввиду сложности согласования задержки ЦЛЗ<sub>1</sub> с задержкой звена ЦЛЗ<sub>2</sub>. Некоторое улучшение линейности за счет многоступенчатого сегментирования ЦЛЗ, составленной из одинаковых звеньев во всех сегментах [16], не решает проблемы.

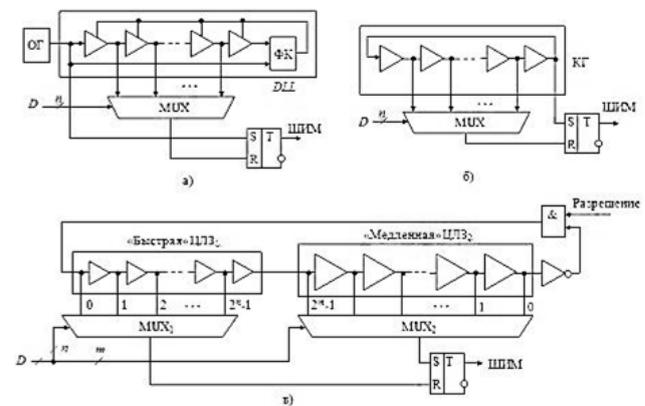


Рисунок 2 – Структуры ШИМ-модуляторов: а – на основе DLL, б – на основе КГ, в – на основе сегментированной ЦЛЗ

Подобный подход использован и в описываемом ниже устройстве (рисунок 3), где равенство суммы «малых» квантов времени, определяющих разрешающую способность цифрового модулятора, протяженности «большого» кванта, множество которых составляет период генерируемых импульсов, достигается естественным путем. Для этого традиционный метод формирования интервала времени пересчетом опорных импульсов сочетается с фазовой интерполяцией опорного периода, для этого в качестве опорного генератора используется КГ. Ядро схемы образует цифровой фазовращатель [16], который, будучи дополненным выходным триггером, представляет собой ШИМ-модулятор с повышенным разрешением.

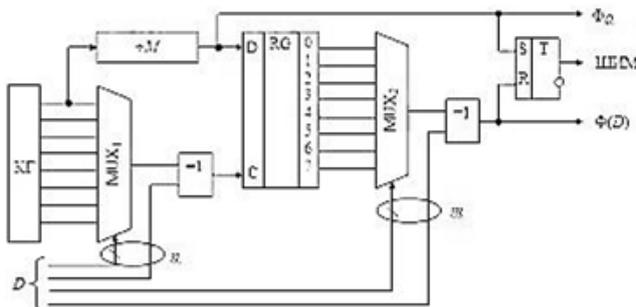


Рисунок 3 – ШИМ-модулятор на основе цифрового фазовращателя

Схема включает две ступени регулирования фазы, каждая из которых снабжена мультиплексором и вентилем ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ. Фаза выходных импульсов фазовращателя  $\Phi(D)$  определяется  $(m+n)$ -разрядным кодом  $D$ , младшие  $n$  разрядов которого, составляя адрес первого мультиплексора  $MUX_1$ , выбирают рабочую фазу КГ, а старшие  $m$  разрядов посредством второго мультиплексора  $MUX_2$ , выбирают рабочий выход сдвигающего регистра. Для определенности в рассматриваемом примере принято  $m = n = 4$ .

Рабочую частоту устройства задает КГ, импульсы с его первого выхода через делитель частоты на  $M$  с фазой  $\Phi_0$  передаются к информационному входу сдвигающего регистра второй ступени, тактовыми импульсами регистра служат выбираемые  $MUX_1$  импульсы выходов КГ. Вентили ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ выполняют функции управляемых инверторов, их включение позволяет сократить в два раза сложность цифровых узлов. Регулирование фазы  $\Phi(D)$  относительно опорной фазы  $\Phi_0$  происходит в следующем порядке. КГ вырабатывает на своих  $2^{n-1}$  выходах последовательности импульсов вида «меандр» с фазовым шагом  $\Delta\varphi_1 = \pi/2^n$ , импульсы «сшиты» по фазе в пределах  $\pi$ , при этом фаза импульса на последнем выходе КГ меньше полупериода на  $\Delta\varphi_1$ . Недостающее для образования полного в пределах периода множество фаз в диапазоне  $\pi \dots (2\pi - \Delta\varphi_1)$  образуется вентилем ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ на выходе  $MUX_1$ . Это позволяет программировать фазу тактовых импульсов

регистра в пределах  $0 \dots 2\pi$  с шагом  $\Delta\varphi_1$  младшими разрядами кода  $D$ .

Опорные сигналы  $\Phi_0$ , период которых в  $M = 2^m$  раз больше периода КГ, поступая на информационный вход сдвигающего регистра, последовательно переключаются по его разрядам тактовыми импульсами первой ступени. Эти тактовые импульсы смещены во времени относительно опорных импульсов  $\Phi_0$  на  $D_n T_0 / 2^n$  ( $D_n$  – двоичный эквивалент младшей части кода  $D$ ,  $T_0$  – период КГ). Шаг фазового сдвига импульсов на выходах регистра в единицах их периода составляет  $\Delta\varphi_2 = \pi/2^{m-1}$ . Выбор того или иного выхода регистра выполняется вторыми мультиплексором и вентилем ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ в соответствии со значением  $m$  старших разрядов кода  $D$  аналогично тому, как это делается в первой ступени. Таким образом, старшие разряды кода  $D$  определяют фазовую задержку выходного импульса  $\Phi$  в единицах  $\Delta\varphi_2$ , а младшие – в единицах  $\Delta\varphi_1$ . Поскольку

$$\Delta\varphi_1 = \Delta\varphi_2 / 2^n, \Delta\varphi_2 = 2\pi / 2^m,$$

то результирующий фазовый сдвиг выходного сигнала  $\Phi$  относительно опорного сигнала  $\Phi_0$  оказывается равным

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_2 + \Delta\varphi_1 = \frac{D_m}{2^m} \times 2\pi + \frac{D_n}{2^n} \times \frac{2\pi}{2^m} = 2\pi \times \frac{D}{2^{m+n}},$$

где  $D = 2^n D_m + D_n$  – полный цифровой код фазы. Триггер, соединенный входами с выходами фазовращателя, формирует ШИМ-сигналы.

В построённых по традиционным схемам цифровых фазовращателях [17, 18] шаг дискретизации равен тактовому периоду, что ограничивает рабочую частоту модуляторов. По сравнению с известными устройствами в описанном модуляторе шаг квантования фазы при той же опорной частоте сокращен в  $2^n$  раз, именно настолько повышена точность модулятора. Так, если в [20] квант фазы составляет  $22,5^\circ$ , то в описанном модуляторе при  $n = m = 4$  он снижен до  $1,4^\circ$ .

В тех случаях, когда необходима перестройка фазы при поддержании стабильного периода импульсов, а аналоговая стабилизация по типу системы *DLL* невозможна, например, при проектировании устройства на ПЛИС, окажется полезным предложенный в [20] генератор с раздельной цифровой регулировкой частоты и фазы импульсов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Yamauchi, T. A low-power and high-speed data transfer scheme with asynchronous compressed pulse width modulation for AS-memory / T. Yamauchi, Y. Morooka, H. Ozaki // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – April 1996. – Vol.31, No.4, – P. 523–530.
2. Chen, W.-H. A CMOS 400-Mb/s serial link for AS-memory systems using a PWM scheme / W.-H. Chen, G.-K. Dehng, J.-W. Chen, S.-I. Liu // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – October 2001. – Vol.36, No.10. – P. 1498–1505.

3. Чулков, В.А. Интерполирующие устройства синхронизации и преобразователи информации. – М.: Физматлит, 2010. – 324 с.
4. Чулков, В.А. Управляемые кольцевые генераторы импульсов в технике синхронизации. / В.А. Чулков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2017. – № 1(41). – С. 30–42.
5. Thoren, M. Accurate, Fast Settling Analog Voltages from Digital PWM Signals [Электронный ресурс] / M. Thoren, Ch. Steward // Linear Technology. – Режим доступа: <http://www.linear.com/solutions/5683>. – (Дата обращения: 23.01.2018).
6. Аристов, А.В. Преобразователь с широтно-импульсной модуляцией для активной компенсации продольных колебаний / А.В. Аристов // Доклады ТУСУРа. – 2008. – № 2 (18), часть 2. – С. 167–60.
7. Caldwell, J. Analog Pulse Width Modulation [Электронный ресурс] / J. Caldwell // Texas Instruments – Режим доступа: <https://www.ti.com/lit/ug/slau508/slau508.pdf>. – (Дата обращения: 23.01.2018).
8. Stork, M. Pulse width modulation with frequency changing / M. Stork, P. Weissar, K. Kosturik // 2015 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), 26-28 Nov. 2015. – P. 96–100.
9. Morton, S.L. High resolution 20 GHz wideband delay generator / S.L. Morton, K. Elliott, M. Rodwell // Electronics Letters // 30 September 2004. – Volume 40, Issue 20. – P. 1248–1249
10. Jovanovic, G. Programmable jitter generator based on voltage controlled delay line / G. Jovanovic, M. Stojcev, T. Nikolic, Z. Stamenkovic. // Scientific publications of the state university of novi pazar ser. A: Appl. Math. Inform. and Mech. – 2012. – Vol. 4, 1. – P. 61–73.
11. Ansari, M.S., Singh B., Navathe C.P. A low jitter variable delay generator for regenerative amplifier in a table top terawatt femto second laser system / M.S. Ansari, B. Singh, C.P. Navathe // Indian Journal of Engineering and Materials Sciences. – August 2006. – Vol. 13. – P. 269–274.
12. Giordano, R. High-resolution synthesizable digitally-controlled delay lines / R. Giordano, F. Ameli, P. Bifulco, V. Bocci, S. Cadeddu, V. Izzo, A. Lai, S. Mastroianni, A. Aloisio // IEEE Transactions on Nuclear Science. – Dec 2015. – Vol. 62. – No. 6. – P. 3163–3171.
13. Cui, K. A high-linearity, ring-oscillator-based, Vernier time-to-digital converter utilizing carry chains in FPGAs / K. Cui, Z. Ren, X. Li, Z. Liu, R. Zhu // IEEE Transactions on Nuclear Science. – Jan 2017. – Vol. 64, No. 1. – P. 697–704.
14. Чулков, В.А. Анализ точности интерполяции опорного периода системой автоподстройки задержки / В.А. Чулков, М.М. Бутаев // Вопросы радиоэлектроники, сер. ЭВТ. – 2010. – Вып. 5. – С. 140–148.
15. Tang, R. A. Novel 8-Phase PLL Design for PWM Scheme in High Speed I/O Circuits / R. Tang, Y.B Kim // IEEE International SOC Conference, Austin, Texas. – 2006. – P.119–122.
16. Цифровой фазовращатель – Патент РФ 2173933 / Чулков В.А.
17. Syed, A. Digital pulse width modulator architectures / A. Syed, E. Alarcon // Proceedings of 2004 IEEE 3<sup>rd</sup> Annual Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany. – 2004, PESC 04. – Vol. 6. – P. 4689 – 4695.
18. Цифровой управляемый фазовращатель. – Авт. свид. СССР 1223343/ Соколов В.И., ЩигOLEV С.А., Накоряков Г.Е.
19. Боутин, Н. Фазовый манипулятор с разрешающей способностью 22,5° / Н. Боутин // Электроника. – 1980. – №10. – С. 63.
20. Генератор с отдельной цифровой регулировкой частоты и фазы импульсов. – Патент РФ №2168268 / Чулков В.А.

*Статья поступила в редакцию 01.02.2018*

*Статья принята к публикации 14.03.2018*

УДК 536.252

## РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПОПРАВКИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЖАРКИ ВО ФРИТЮРЕ

© 2018

**Гайсин Ирек Анасович**, старший преподаватель кафедры «Высокоэнергетические процессы и агрегаты»  
*Набережночелнинский институт (филиал), Казанский (Приволжский) федеральный университет*  
(423810, Россия, г. Набережные Челны, пр. Мира, 68/19, e-mail: azpirin123z@yandex.ru)

**Исрафилов Ирек Хуснемарданович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой  
«Высокоэнергетические процессы и агрегаты»  
*Набережночелнинский институт, Казанский (Приволжский) федеральный университет*  
(423810, Россия, г. Набережные Челны, пр. Мира, 68/19, e-mail: irmaris@yandex.ru)

**Аннотация.** Обжаривание во фритюре является одной из наиболее широко распространенных технологий производства кулинарных изделий и одной из основ мировой индустрии питания. В связи с этим, перед исследователями постоянно стоит задача стабильного повышения качества продукции, тепловой экономичности и эксплуатационных характеристик оборудования, которая, в том числе, может быть решена и путем повышения точности задания теплового режима разогрева фритюрного масла. В свою очередь тепловой режим разогрева фритюрного масла напрямую влияет на его качество и качество конечного продукта. Известно, что для некоторых сред макроскопическое состояние в данный момент времени зависит от их состояния в более ранние моменты времени (явление памяти). В работе рассмотрены подходы к моделированию теплофизических процессов жарки во фритюрном масле на основе теории сред с памятью. Показано влияние степени деградации масла на изменение его вязкости и коэффициента конвективной теплопередачи. В результате анализа данных выведены формулы соответствующих поправок. Сделан вывод, что для управления качеством продуктов питания требуется учет данных факторов при разработке математической модели процесса.

**Ключевые слова:** вязкость, коэффициент конвективной теплопередачи, деградация масла, математическая модель.

## RHEOLOGICAL CORRECTIONS TO MODELING OF THERMOPHYSICAL FRYING PROCESSES IN FRYING OIL

© 2018

**Gajsin Irek Anasovich**, Senior Lecturer of the Department «High-Energy Processes and Units»  
*Kazan Federal University, Naberezhnye Chelny Institute (branch)*  
(423810, Russia, Republic of Tatarstan, Naberezhnye Chelny, Mira av., 68/19, e-mail: azpirin123z@yandex.ru)

**Israfilov Irek Husnemardanovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department  
«High-Energy Processes and Units»  
*Kazan Federal University, Naberezhnye Chelny Institute*  
(423810, Russia, Republic of Tatarstan, Naberezhnye Chelny, Mira av., 68/19, e-mail: irmaris@yandex.ru)

**Abstract.** The deep-frying is one of the most widespread technologies for the production of culinary products and one of the foundations of the global food industry. In this connection, the researchers are faced with the continuous task of stable improvement of product quality, thermal efficiency and operating characteristics of equipment, which can be solved by increasing the precision of setting the thermal regime of heating the frying oil. In turn, the thermal mode of heating the frying oil directly affects its quality and the quality of the final product. It is known that for some media the macroscopic state at a given time depends on their state at earlier time (the phenomenon of memory). These work deals with the modeling of thermo-physical processes in frying oil on the basis of the theory of materials with memory. The influence of the oil degradation degree on the changes in its viscosity and convective heat transfer coefficient is shown. As a result of the data analysis, formulas for the corresponding corrections are derived. The conclusion is drawn that for the management of the quality of food it is necessary to analyze data when developing a mathematical model of the process.

**Keywords:** viscosity, heat conduction coefficient, oil degradation, mathematical model.

Процесс обжаривания во фритюре контролируется теплопередачей между маслом, используемым для жарки, и обжариваемым продуктом. Тепло последовательно передается через два участка с различными характеристиками теплопередачи: масляную пленку и обжаренную корку [1]. Сначала тепло передается от масла для жарки на поверхность продукта посредством конвекции. Затем оно переносится с поверхности во внутреннюю часть продукта посредством проводимости. Скорость тепловой конвекции связана с испарением воды, которое меняется во время жарки.

На ранней стадии жарки испарение воды возрастает, образуются и интенсивно движутся пузырьки, что приводит к взбалтыванию масла, увеличению конвекции и возрастанию теплоотдачи. На последней стадии жарки содержание влаги и тепловая конвекция уменьшается [2, 3].

Термодинамика таких неравновесных процессов достаточно хорошо разработана для простых моделей среды, когда справедливы линейные соотношения между термодинамическими силами и потоками, и эти связи носят локальный и мгновенный характер [4].

Однако имеются среды, для которых макроскопическое состояние в данный момент времени зависит от их состояния в более ранние моменты времени (явление памяти) или их состояние в данной точке зависит от состояния в других точках (явление нелокальности). Наиболее часто данный подход реализуется в пищевой промышленности, в которой многие жидкие и полужидкие вещества имеют свойства, отличные от свойств классических (Ньютоновских) жидкостей [5]. В частности, при моделировании теплообмена при стерилизации герметично упакованных пищевых продуктов следует учитывать температурную зависимость кажущейся вязкости ( $\mu$ ) жидкой пищи, поскольку изменение  $\mu$  с температурой является преобладающим по сравнению с изменениями других теплофизических характеристик. [5, 6]. В этом случае температурная зависимость  $\mu$  включается в модель путем сравнения экспериментальных данных с полиномиальным уравнением, где температура является единственной независимой переменной [7]. В этом случае необходимо использовать реологическую модель, учитывающую влияние температуры и скорости сдвига на кажущуюся вязкость пищи.

Однако, кроме Бингамовского пластика и псевдопластика, имеется большое число других разновидностей неньютоновских жидкостей, вязкость которых зависит не от усилия сдвига, а от времени. В том случае, если вязкость материала под воздействием усилия со временем снижается, данная жидкость называется тиксотропной, а если повышается, то такая жидкость называется реопектической [8].

У большинства таких жидкостей эти изменения вязкости связаны с физико-химическими процессами, происходящими в них под воздействием внешних факторов – переходами гель-золь или другими изменениями структуры вещества. Хотя такие жидкости встречаются крайне редко, в последнее время появляются данные, что некоторые вещества, ранее считающимися классическими ньютоновскими жидкостями, при определенных условиях приобретают некоторые свойства тиксотропных или реопективных жидкостей. В частности, такие тиксотропные свойства обнаруживаются у биодизелей при пониженных температурах, хотя в целом они продолжают считаться ньютоновскими жидкостями [9].

Определенные реопектические свойства были отмечены у образцов жира из отходов производства мясокостной муки [10]. Показано, что эти жиры изменяют реологические свойства при понижении температуры из-за образования кристаллов [11]. Триацилглицеролы кристаллизуются примерно при 31-32° С, по этой причине жир при температуре ниже 32° С ведет себя как неньютоновская жидкость [11], а данные жиры были охарактеризованы как жидкость с реопектическим поведением [10].

Таким образом, поскольку жиры и такие производные растительных масел, как биодизель, при нестандартных условиях способны вести себя способом, отличным от классической ньютоновской жидкости, хотя ими и продолжают при этом считаться, было

проведено исследование поведения при нестандартных условиях такой считающейся классической ньютоновской жидкости, как растительное масло, используемое для жарки во фритюре.

Растительные масла при стандартных условиях являются классическими ньютоновскими жидкостями [12]. Однако в процессе жарки они подвергаются длительному нагреву при высоких температурах (вплоть до 200° С) при постоянном перемешивании за счет температурной конвекции и выделяющихся при жарке пузырьков пара. Данные воздействия вызывают в них окисление под действием кислорода воздуха и гидролиз под действием содержащейся в обжариваемом продукте воды, приводящие к образованию полярных компонентов а также изомеризацию, циклизацию и полимеризацию вследствие прямого действия высоких температур, влияющие на химико-физические свойства масла. Необходимо отметить, что эти изменения намного более медленные, чем происходящие в животных жирах [10, 11], они занимают часы и сутки, а не минуты, но, тем не менее, так же эффективно вызывают изменение их физико-химических свойств. Многие из этих изменений носят циклический характер и имеют свойства гистерезиса. В частности, такие изменения характерны для изменения содержания полярных продуктов, происходящих в циклах жарки при разных температурах (рисунок 1).

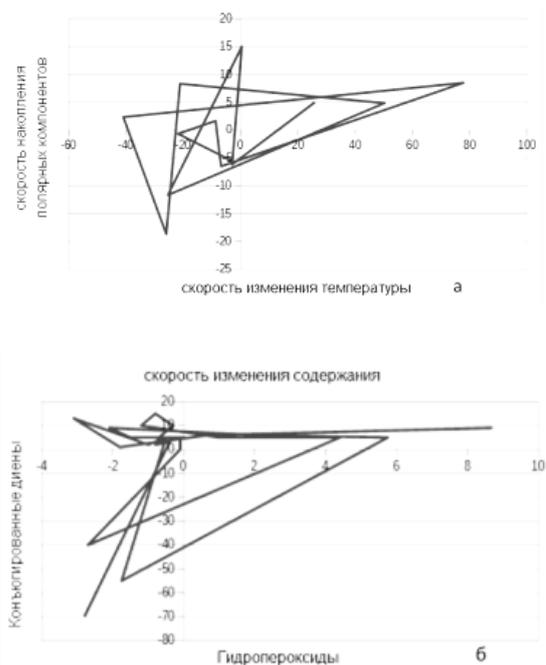


Рисунок 1 – а) Скорость накопления полярных компонентов как функция скорости изменения температуры масла во время жарки и б) Соотношение скорости изменения конъюгированных диенов и пероксидов деградированного масла при нагреве в течение 3-х часов до 180° С. (Расчеты проведены по данным [13]).

На рисунке видно, что изменение скорости накопления полярных компонентов по сравнению со скоростью изменения температуры происходит циклически и имеет

явные признаки петель гистерезиса (рисунок 1а). Еще более наглядно выглядит цикличность взаимного изменения скорости изменения содержания разных типов продуктов перекисного окисления липидов – конъюгированных диенов и пероксидов (рисунок 1б).

Таким образом, изменения химического состава деградирующего масла при жарке носят циклический характер. Поскольку изменения в химическом составе веществ должны отражаться на изменении их физических свойств, было проведено изучение данных о влиянии этих изменений на такое важное для жарочного масла свойство, как его вязкость.

Наиболее полно исследования деградации масла под влиянием длительного нагрева при 190° С и его влияния на вязкость масла были проведены Tseng с соавторами [12]. Ими было показано, что вязкость возрастала с увеличением степени деградации масла более чем в 2 раза с  $2,04 \cdot 10^{-3}$  до  $4,39 \cdot 10^{-3}$  Па. При этом отмеченное увеличение вязкости после 30 часов жарки происходило намного быстрее.

Также необходимо отметить, что данное увеличение вязкости масла вызывало образование гистерезисообразной петли, хорошо заметной на графиках, построенных как в обычных, так и в полулогарифмических координатах, что, наряду с зависимостью вязкости от времени воздействия, является одним из характерных признаков «среды с памятью» (рисунок 2).

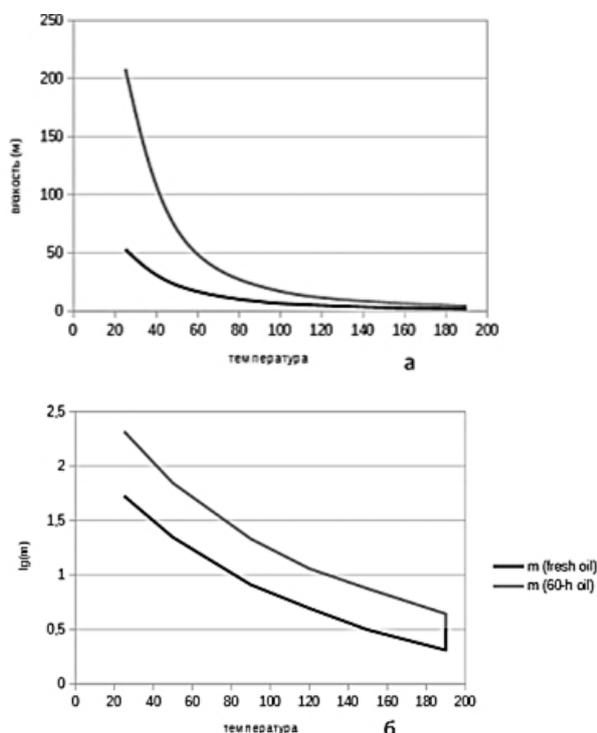


Рисунок 2 – Влияние длительной деградации масла на его вязкость при разных температурах по данным [12]. Синяя ветка графика — вязкость свежего масла при нагреве, красная ветка графика – вязкость деградированного масла при охлаждении при а) линейной шкале и б) логарифмической шкале по оси Y

Это увеличение вязкости масла, по видимому, связано с образованием соединений с более высокой молекулярной массой с углеродными связями между окисленными жирными кислотами [14]. Оно также напрямую связано с образованием полимерных соединений из-за воздействия кислорода при высокой температуре во время жарки [15]. Известно, что образование общих полярных веществ увеличивается с каждым циклом жарки и коррелирует с изменением вязкости масла ( $R^2 = 0,93$ ) [16].

Для анализа зависимости вязкости деградирующего масла от времени, были обработаны и проанализированы исходные данные, приведенные в работах Y.C. Tseng с соавторами [12], В.П. Максимец с соавторами [17] и E.P. Kalogianni с соавторами [18]. Было установлено, что все исследования проводились при температуре деградации масла в районе 180-190° С, а измерения проводились в основном при температуре 50° С. При этом данные о зависимости вязкости от времени хорошо описываются как кубической полиномиальной регрессией, так и экспоненциальной регрессией с высокой степенью коэффициента корреляции  $R^2 = 0,9789$  в первом случае и  $R^2 = 0,9772$  во втором случае (рисунок 3а,б).

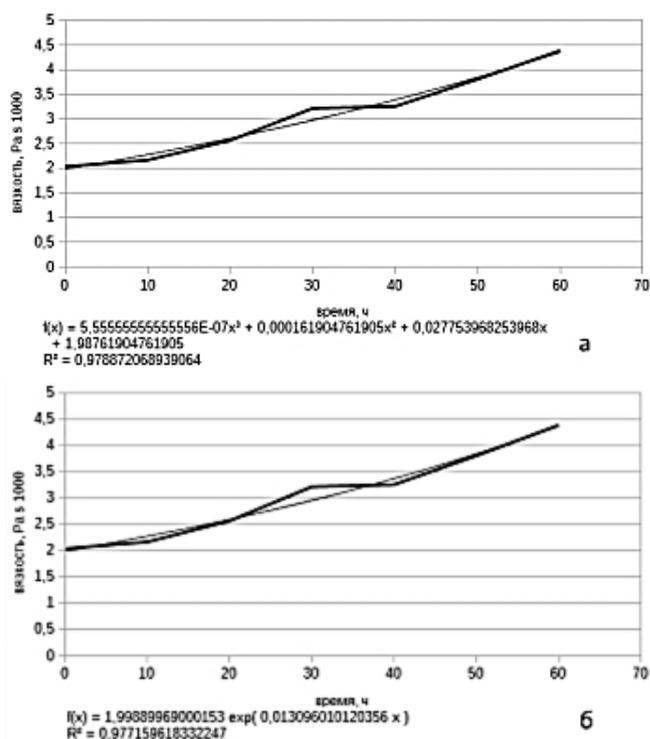


Рисунок 3 – Регрессионный анализ данных [12] по увеличению вязкости в зависимости от времени деградации. а) полиномиальная регрессия, б) экспоненциальная регрессия

Хотя экспоненциальная регрессия и коррелировала с экспериментальными данными немного хуже, чем полиномиальная, но она имеет ясный физический смысл, в связи с чем и была использована в дальнейшем. Формула экспоненциальной регрессии для вязкости  $\mu = a \cdot \exp(b \cdot t)$  имеет два коэффициента –  $a$  и  $b$ . Коэффициент  $a$  в этом уравнении соответствует вязко-

сти свежего масла ( $\mu_0$ ) и сильно зависит от температуры измерения, коэффициент  $b$  характеризует крутизну экспоненты, т. е. скорость химической деградации и в основном зависит от химического состава масла. Результаты анализа этих коэффициентов для имеющихся в литературе данных приведены в таблице 1.

Необходимо отметить, что коэффициент  $a$  показывает намного более сильную зависимость от температуры, чем от состава исследуемого масла, как и положено для растительных и животных жиров [19]. Коэффициент же  $b$  в основном зависел именно от состава масла. Для соевого (0,01847), подсолнечного (0,01872) и пальмового (0,01730) масла эти коэффициенты были достаточно близки, что свидетельствует о близких скоростях их деградации под действием высокой температуры. Оливковое масло имеет намного меньшее значение коэффициента  $b$ , что свидетельствует о намного меньшем увеличении его вязкости под действием высокой температуры.

Таблица 1 – Значения коэффициентов  $a$  и  $b$ , полученных на основании анализа литературных данных, в уравнении  $\mu = a \exp(b \cdot t)$  и корреляция между расчетными и экспериментальными данными.

Сорт масла, условия деградации и измерения	коэффициенты		
	$a$	$b$	$R^2$
Источник [12]:			
Соевое масло. деградация при 190° С, измерение при 190° С	0,00200	0,01308	0,97706
Соевое масло. деградация при 190° С, измерение при 50° С	0,02001	0,01847	0,95126
Источник [17]:			
Подсолнечное масло. деградация при 180°С, измерение при 50° С	0,02584	0,01872	0,98449
Источник [18]:			
Пальмовое масло. деградация при 180°С, измерение при 50° С	0,02622	0,01730	0,99372
Оливковое масло. деградация при 180°С, измерение при 50° С	0,02556	0,00778	0,98942

Коэффициент корреляции между расчетными и экспериментальными данными достаточно высок,  $R^2$  не опускается ниже 0,95, что позволяет распространить использование этой формулы на весь ряд используемых при жарке масел.

Таким образом, при длительном нагреве при высокой температуре масло для жарки приобретает ряд свойств, характерных для «среды с памятью» изменение его свойств при длительном нагреве можно описать, учитывая то, что  $a \approx \mu_0$ , формулой:

$$\mu = \mu_0 \cdot \exp(b \cdot t_{жy}), \quad (1)$$

где  $\mu_0$  – вязкость свежего масла при температуре измерения,  $b$  – коэффициент, зависящий от химической структуры масла, а  $t_{жy}$  – время с последней замены масла.

Второй величиной, на которую влияет деградация масла, является величина конвективного теплообмена  $h$ . Известно, что она уменьшается по мере снижения качества масла [12]. Коэффициент конвективного теплообмена соевого масла нелинейно уменьшается с 274,4 до 225,0 Вт м<sup>2</sup> К<sup>-1</sup> при 190° С по мере увеличения времени деградации. Эти экспериментальные

данные хорошо описываются экспоненциальным уравнением первого порядка:  $h = 276,5 - 0,525 \cdot \exp(0,076 \cdot t)$ ; ( $R^2 = 0,97$ ) (рисунок 4). При этом изменения величины  $h$  обратно пропорциональны изменению вязкости деградированного масла, а коэффициент корреляции между этими двумя свойствами достаточно высокий ( $R = -0,98$ ).

При этом изменения величины  $h$  обратно пропорциональны изменению вязкости деградированного масла, а коэффициент корреляции между этими двумя свойствами достаточно высокий ( $R = -0,98$ ).

Коэффициент конвективного теплообмена соевого масла при 180 °С также выше для свежего масла (282 Вт / м<sup>2</sup>К), чем для отработанного масла (261 Вт / м<sup>2</sup>К) [20]. Аналогичные результаты имеются для 190° С (285 для свежего и 273 Вт / м<sup>2</sup>К для отработанного соевого масла) [21].

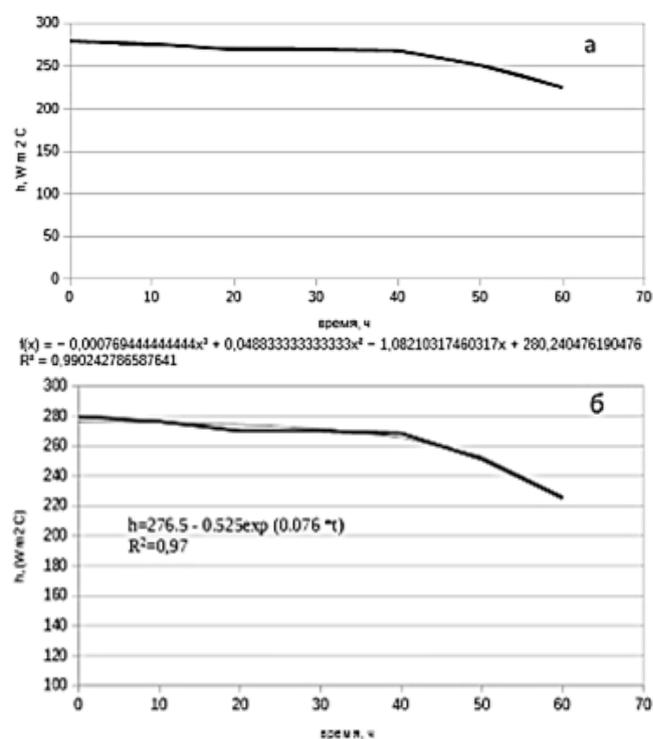


Рисунок 4 – Экспериментальные (по [12]) и расчетные данные по влиянию деградации масла на величину коэффициента конвективной теплопередачи. а) полиномиальная регрессия, б) экспоненциальная регрессия

Таким образом, несмотря на то, что величина  $h$  в настоящее время во всех работах считается константой, на самом деле она является зависящей от времени использования масла переменной. Данная величина изменяется в ходе жарки в достаточно больших пределах (до 20% за цикл использования масла), что, несомненно, оказывает влияние энергетический обмен во время жарки. В связи с этим, несмотря на то, что полиномиальная регрессия давала более высокий коэффициент корреляции, чем экспоненциальная (рисунок 4), в дальнейшем необходимо использовать именно экспоненциальную регрессию, поскольку ее коэффициенты имеют

физический смысл. Вследствие этого

$$h = h_0 - a \cdot \exp(b \cdot t_{fry}), \quad (2)$$

где  $h$  – коэффициент внешнего теплообмена,  $h_0$  – коэффициент внешнего теплообмена со свежим маслом,  $t_{fry}$  – время, прошедшее с последней замены масла,  $a$  и  $b$  – эмпирические коэффициенты.

Таким образом, у масла, используемого для жарки, во время жарки обнаруживаются некоторые свойства, характерные для такой неньютоновской «жидкости с памятью», как реопектическая жидкость. Длительный нагрев вызывает значительные изменения таких его физических свойств, как вязкости и коэффициента конвективного теплообмена, которые обязательно должны учитываться при разработках математических моделей жарки во фритюре.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- Ahromrit A. Heat and mass transfer in deep-frying of pumpkin, sweet potato and taro. [Text] / A. Ahromrit, P.K. Nema // Journal of Food Science and Technology. – 2010. – V. 47(6). – P. 632–637.
- Costa R.M. Analysis of the heat transfer coefficient during potato frying [Text] / R.M. Costa, F.A.R. Oliveira, O. Delaney, V. Gekas // Journal of Food Engineering. – 1999. – V.39. – P. 293–299.
- Fellows P.J. Food processing technology – Principles and practice (2nd ed.) / P.J. Fellows // Cambridge: Woodhead Publishing Limited. 1996. – P. 331–332.
- Дэй У.А. Термодинамика простых сред с памятью / У.А. Дэй. // Новости фундаментальной физики. – вып.4. – Издательство «Мир». – Москва, 1974. – 191 с.
- Steffe J.F. [Text] / J.F. Steffe // Rheological Methods in Food Process Engineering, 2nd edn. Freeman Press, East Lansing, MI.: 1996.
- Abdul Ghani A.G. Theoretical and experimental investigation of the thermal inactivation of Bacillus stearothermophilus in food pouches [Text] / A.G. Abdul Ghani, M.M. Farid, X.D. Chen // Journal of Food Engineering. – 2002. – V. 51(3). – P. 221–228.
- Abdul Ghani A.G. Thermal sterilization of canned food in a 3-D pouch using computational fluid dynamics. [Text] / A.G. Abdul Ghani, M.M. Farid, X.D. Chen, P. Richards // Journal of Food Engineering. – 2001. – V. 48. – P. 147–156.
- Elert G. The Physics Hypertextbook. Viscosity. 1998–2017 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://physics.info/viscosity/>. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 14.07.2017).
- Alicke A.A. Guidelines for the rheological characterization of biodiesel [Text] / A.A. Alicke, B.C. Leopercio, F.H. Marchesini, P.R. de Souza Mendes // Fuel. – 2015. – V. 140. – P. 446–452.
- Travnicek P. Rheoplectic Behavior of Rendered Fat [Text] / P. Travnicek, E. Krcalova, T. Vitez // Pol. J. Environ. Stud. – 2013. – V. 22(5). – P. 1499–1504.
- Bell A. Effect of composition on fat rheology and crystallisation. [Text] / A. Bell, M.H. Gordon, W. Jirasubkunakorn, K.W. Smith // Food Chem. – 2007. – V. 101. – P. 799.
- Tseng Y.C. Total frying-use time effects on soybean-oil deterioration and on tortilla chip quality. [Text] / Y.C. Tseng, R. Moreira, X. Sun // International Journal of Food Science and Technology. – 1996. – V. 31(3). – P. 287–294.
- Ziaifafar A.-M. Oil absorption during deep-fat frying: mechanisms and important factors. [Text] / A.-M. Ziaifafar // Engineering Sciences [physics]. AgroParisTech. – 2008. – English.
- Lalas S. Frying stability of Moringa stenopetala seed oil. [Text] / S. Lalas, O. Gortzi, J. Tsaknis // Plant Food Hum. Nutr. – 2006. – V. 61(2). – P. 99–108.
- Kochhar S.P. New theoretical and practical aspects of the frying process. [Text] / S.P. Kochhar, C. Gertz // Eur. J. Lipid Sci. Technol. – 2004. – V. 106. – P. 722–727.
- Debnath S. Effect of frying cycles on physical, chemical and heat transfer quality of rice bran oil during deep-fat frying of poori: An Indian traditional fried food [Text] / S. Debnath, N.K. Rastogi, A.G. Gopala Krishna, B.R. Lokesh // Food and bioproducts processing. – 2012. – V. 90. – P. 249–256.
- Максимец В.П. Изменение масла при нагреве [Текст] / В.П. Максимец, Н.В. Федак, Э.Ф. Кравченко, Д.В. Баранов // Известия ВУЗов. Пищевая технология. – 1993. – №1-2. – С. 52–54.
- Kalogianni E.P. Effect of repeated frying on the viscosity, density and dynamic interfacial tension of palm and olive oil [Text] / E.P. Kalogianni, T.D. Karapantsios, R. Miller // Journal of Food Engineering. – 2011. – V. 105. – P. 169–179.
- Czechlowski M. Exhaust opacity in a diesel engine powered with animal fats. [Text] / M. Czechlowski, W. Golimowski, T. Sęk, J. Szymanowicz // Maintenance and Reliability. – 2015. – V. 17(1). – P. 49–53.
- Miller K.S. Convective heat transfer coefficient for frying oils. [Text] / K.S. Miller, R.P. Singh // Annual Meeting of Institute of Food Technologists, New Orleans, Louisiana, USA, 1992. June 20-24. Institute of Food Technologists: Chicago, Illinois.
- Moreira R.G., Palau J.E., Sweat V.E. Thermal properties of tortilla chips during deep-fat frying. [Text] / R.G. Moreira, J.E. Palau, V.E. Sweat // International Winter Meeting of American Society of Agricultural Engineers. St. Joseph, Michigan: American Society of Agricultural Engineers. St Joseph, MI. – 1992. – Paper No. 92-6595.

Статья поступила в редакцию 26.01.2018

Статья принята к публикации 12.03.2018

УДК 664.8

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ ПЛОДОВ ОБЛЕПИХИ РАЗЛИЧНОЙ СОРТНОСТИ, ПОЛУЧЕННОЙ ПРИ КАВИТАЦИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

© 2017

**Ницевская Ксения Николаевна**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник  
*Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук, доцент  
Новосибирский аграрный университет*

*(630501, Россия, Новосибирская область, Новосибирский район, р.п. Краснообск, а/я 463)*

**Мотовилов Олег Константинович**, доктор технических наук, главный научный сотрудник  
*Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук  
(630501, Россия, Новосибирская область, Новосибирский район, р.п. Краснообск, а/я 463)*

**Чекрыга Галина Петровна**, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник  
*Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук  
(630501, Россия, Новосибирская область, Новосибирский район, р.п. Краснообск, а/я 463)*

**Аннотация.** В статье обобщена и проанализирована информация по биохимическому составу плодов облепихи различных регионов. Обобщены данные по показателям – содержание органических кислот, каротиноидов, масла, полифенолов, растворимых сухих веществ, сахарокислотный индекс содержание суммы сахаров в плодах облепихи. Приведены сравнительные параметры исследуемых сортов. Для установления влияния технологических параметров на реологические свойства и микробиологические показатели, использовали плоды алтайской селекции, как Елизавета, Иня, Гибрид 165-81-1, Джемоява, Чечек. Описаны основные технологические этапы при кавитационном воздействии переработки плодов облепихи с применением энергии кавитации. Исследование реологических свойств полуфабрикатов из плодов облепихи проводили по следующим характеристикам: расслоение по фракциям (масляная/соковая/осадок), размер косточки, распределение частиц косточки по объему продукта. Установлена регрессионная зависимость изменения реологических свойств продукта от сорта облепихи и технологических параметров (от времени и температуры обработки). Определяли микробиологические показатели – КМАФАнМ, Salmonella, бактерии группы кишечных палочек, дрожжи и плесневые грибы.

**Ключевые слова:** плоды облепихи, кавитация, реологические показатели, микробиологические показатели

## THE STUDY OF SEMI-PRODUCTS FROM SEA BUCKTHORN FRUITS OF DIFFERENT GRADES, OBTAINED UNDER THE ACTION OF CAVITATION

© 2017

**Nitievskaya Ksenia Nikolaevna**, PhD in Technical Sciences, Leading Researcher  
*Siberian Federal Scientific Center of Agro-biotechnology of the Russian Academy of Sciences,  
Associate Professor Novosibirsk Agrarian University*

*(630501, Russia, Novosibirsk region, Novosibirsk district, Krasnoobsk, P.O.B. 463)*

**Motovilov Oleg Konstantinovich**, Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher  
*Siberian Federal Scientific Center of Agro-biotechnology the Russian Academy of Sciences  
(630501, Russia, Novosibirsk region, Novosibirsk district, Krasnoobsk, P.O.B. 463)*

**Chekryga Galina Petrovna**, Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher  
*Siberian Federal Scientific Center of Agro-biotechnology the Russian Academy of Sciences  
(630501, Russia, Novosibirsk region, Novosibirsk district, Krasnoobsk, P.O.B. 463)*

**Abstract.** The article summarized and analyzed information on biochemical composition of sea buckthorn fruits in different regions. The data are summarized on the following indicators – the content of organic acids, carotenoids, oils, polyphenols, soluble solids, sugar and acid index, the content of total sugars in sea buckthorn fruits. Comparative parameters of the studied varieties are discussed. To determine the effect of process parameters on the rheological properties and microbiological indicators we used the fruits of such Altai line breeding as Elizabeth, Inya, Hybrid 165-81-1, Jam, Chechek. We describe the basic technological stages under the action of cavitation processing of sea-buckthorn fruits with the use of the energy of cavitation. Investigation of rheological properties of semi-finished products from fruits of sea buckthorn was carried out according to the following characteristics: stratification fractions (oil/juice/sediment), size, distribution of particles of bone volume of the product. Regression relationship of rheological properties of the product from sea-buckthorn varieties and technological parameters (time and temperature treatment) was established. Microbiological indicators of Kmafam, Salmonella, bacteria of intestinal sticks group, yeast and fungi were determined.

**Keywords:** sea buckthorn fruit, cavitation, flow indicators, microbiological indicators

Уникальные свойства облепихи известны давно. Древние греки использовали плоды облепихи в пищу и для лечения домашних животных от паразитов. Большое содержание каротина (провитамин А) и витамин С способствует тому, что кожа домашних животных, в частности лошадей становится гладкой и блестящей, поэто-

му название рода облепихи «*Hippóphaë*» и происходит от греческих слов «*hippus*» – лошадь и «*phaëos*» – блестящий [1]. Вновь возрастающий интерес к этому виду в основном изменений биологически активных свойств в плодах, семенах, листьях, древесине. Осуществлены попытки сравнительного изучения основных биохимических

показателей подвидов облепихи, произрастающих в разных регионах [2-5].

Биологически активные составляющие различных сортов облепихи – пектины, биофлавоноиды, органические кислоты, расширяют область физиологического воздействия на организм человека при:

- недостатке восполнения легкоусвояемых углеводов;
- профилактике гиповитаминозных состояний;
- повышении сопротивляемости организма при психоэмоциональных, физических нагрузках и неблагоприятных факторах окружающей среды [4-8].

Облепиха накапливает в плодах значительное количество масла, где основным компонентом являются жирные кислоты – около 80%, представленные преимущественно эфирами глицерина, а также стеролы, тритерпенолы жирных спиртов, входящих в состав фосфолипидов. В масле облепихи выявлено около 20 жирных кислот, причем содержание ненасыщенных жирных кислот выше, чем насыщенных. Содержание ненасыщенных жирных кислот в масле семян значительно выше, чем в масле мякоти. Биохимический состав представлен по исследуемым сортам (таблица 1) [9,10].

Таблицы 1 – Биохимический состав плодов облепихи

Сорта облепихи	РСВ, %	Сахара, %	СКИ	Органические кислоты в плодах облепихи, %	Содержание полифенолов, мг/100 г	Каротиноиды, мг/100 г	Содержание масла на сырой вес, %
Елизавета	10,2 ± 0,6	6,0 ± 1,0	5,2 ± 2,1	1,3 ± 0,1	69,5 ± 4,8	18,1 ± 1,3	4,4 ± 0,2
Иня	9,9 ± 0,8	5,5 ± 0,5	2,9 ± 0,5	1,9 ± 0,2	50,8 ± 5,7	16,4 ± 1,1	4,2 ± 0,5
Гибрид 165-81-1	15,0 ± 1,0	12,5 ± 2,0	12,0 ± 2,0	4,0 ± 2,0	-	40,0 ± 2,0	9,0 ± 2,0
Джемовая	11,8 ± 0,5	6,4 ± 0,7	4,7 ± 0,5	27,5 ± 0,7	-	27,5 ± 0,5	4,7 ± 0,5
Чечек	8,9 ± 0,7	4,7 ± 0,6	3,3 ± 0,7	20,4 ± 0,5	-	20,4 ± 0,6	5,7 ± 0,6

Примечание «-» нет данных;  
РСВ – содержание растворимых сухих веществ в плодах облепихи, %;  
СКИ – сахарокислотный индекс;  
сахара – содержание суммы сахаров в плодах облепихи, %;

Получение продукции на основе плодов облепихи происходит при различных типах воздействий – с добавлением ферментных (2245077 [11], 2454880 [12]) и пектинсодержащих ингредиентов (2541381 [13]), измельчение сырых плодов и насыщение плодовой мякоти диоксидом углерода с последующими термическими этапами обработки (2490916 [14]).

Недостаточно высокая эффективность используемых способов связана с потерей нативных свойств исходного сырья во время обработки, что требует освоения процессов, сочетающих в себе несколько принципов воздействия на продукт, например, тепलो-

вая обработка (при средних температурах 40–50°С) при воздействии кавитационного поля. Влияние кавитационного поля на растительную клетку ускоряет протекание физическо-химических процессов. Несмотря на то что кавитационное влияние широко применяется в различных отраслях изучение его влияния структуру продуктов и на жизнедеятельность микробиоты в продуктах питания остается актуально.

Цель исследования: исследование влияния технологических параметров и сортности используемых плодов облепихи на реологические свойства и микробиологические показатели полуфабрикатов.

**Материалы и методы исследования.** Объектами исследования были образцы облепихи сортов «Гибрид 165-81-1», «Джемовая», «Елизавета», «Чечек», «Иня», алтайской селекции (НИИСС имени М.А. Лисавенко).

Исследования образцов проводили в течении 2 часов после обработки на механо-акустическом гомогенизаторе. Технология получения полуфабриката из плодов облепихи включала следующие этапы: приемка сырья → сортировка → мойка → составление смеси (плоды облепихи+вода) → измельчение (мякотной фракции) → дробление (косточкой фракции) → гомогенизация (масляная/соковая/осадок) → пастеризация → расфасовка → упаковка → маркировка → охлаждение. Получение полуфабриката осуществляли в механо-акустическом аппарате, под воздействием кавитационного поля мощностью 100-500 Вт/кг, где происходило разрушение межклеточных структур, что способствовало измельчению мякотной и косточковой части [15].

Дробление сырья происходило одновременно с пастеризацией при температуре (26-60°С) в течение 1,5 – 60 мин. Далее готовый продукт был расфасовыван и охлажден до комнатной температуры 19 ± 2°С. Образцы имели жидкую консистенцию, кисло – сладкий облепиховый вкус с выраженным ароматом облепихи.

Для исследования свойств образцов проводили кодирование (таблица 2).

Таблица 2 – Кодирование образцов

Время обработки, мин	Т обработка, °С	Сорт				
		Гибрид 165-81-1	Джемовая	Елизавета	Чечек	Иня
1,5	26 ± 1	1	5	9	13	21
10	46 ± 2	2	6	10	14	-
20	66 ± 2	3	7	11	-	-
25	72 ± 1	4	8	12	-	-
30	52 ± 1	-	-	-	15	-
35	46 ± 2	-	-	-	-	18
40	46 ± 2	-	-	-	-	19
45	46 ± 2	-	-	-	16	-
60	46 ± 2	-	-	-	17	20

Примечание «-» получение образцов по технологическим параметрам не проводилось

Исследование реологических свойств полуфабрикатов из плодов облепихи проводили по следующим характеристикам:

- «расслоение по фракциям (масляная/соковая/осадок)», измеряли в процентном соотношении от 0 до 70% и переводили в баллы:

отсутствие – 0 баллов;  
интенсивность расслоения – от 1 до 7 баллов.

• «размер косточки» измеряли в микрометрах и переводили в баллы:

крупная от 1,01 до 2,00 см в диаметре 3;  
средняя от 0,51 до 1,00 в диаметре 2;  
мелкая до 0,50 в диаметре 1.

• «распределение частиц косточки»:  
по всему объему – 0 баллов;  
в масляной фракции – 2 балла;  
в масляной фракции и в осадке – 3 балла.

Безопасность продукции оценивались по требованиям СанПиН 2.3.2.1078-01 «Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов» (п. 1.6.1.2 полуфабрикаты десертные плодово-ягодные) [16].

Микробиологические показатели проводили согласно ГОСТ: отбор проб (ГОСТ 26669-85 [17]), КМАФАнМ (ГОСТ 10444.15-94[18]), Salmonella (ГОСТ 31659-2012 [19]), бактерии группы кишечных палочек (ГОСТ 31747-2012 [20]), дрожжи и плесневые грибы (ГОСТ 10444.12-2013 [21]).

**Результаты и обсуждение.** Расслоение образцов происходило по трем фракциям, обладающие различными реологическими свойствами в зависимости от технологических параметров обработки сырья и их сортности:

- масляная (верхний слой) – жидкая масса от светло-желтого до желтого цвета, без запаха;
- соковая часть (средний слой) – жидкая масса со взвешенными частицами околоплодной оболочки, раздробленной мякотной части плода и косточковой фракции;
- осадок (нижний слой) – плотная масса состоящая из фрагментов косточки и растительных волокон превышающих по массе взвесь соковой часть.

Исследуемые характеристики наглядно изображены на рисунке 1.

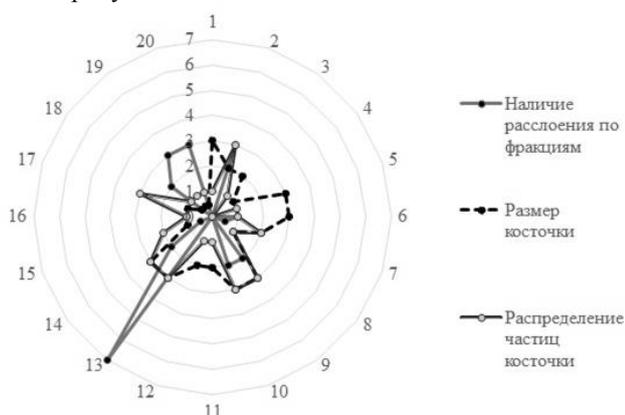


Рисунок 1 – Реологические свойства образцов полуфабрикатов из плодов облепихи, балл

Для получения гомогенного продукта, устойчивого к расслоению по исследуемым характеристикам соответствовал сорт «Гибрид 165-81-1» (образцы № 1 – 4). Данные образцы имели наименьшее количество баллов.

Околоплодная оболочка, косточка легко поддавались переработке в процессе диспергирования.

Сорт «Джемвая» имел крупную косточку, образование косточковой фракции происходило при термообработке от  $46 \pm 2^\circ \text{C}$  до  $72 \pm 1^\circ \text{C}$  в интервале от 10 до 25 минут (образцы №6 – 8).

В образцах полуфабриката, полученных из сортов «Елизавета» (образцы № 9 – 12) и «Чечек» (образцы № 13-16), образование гомогенного продукта происходило в течении 20 минут в температурном диапазоне от  $66$  до  $72^\circ \text{C}$ , или в течении 30 минут с постоянным охлаждением при температуре от  $47$  до  $52^\circ \text{C}$ . При увеличении времени обработки до 60 минут отмечена агломерация частиц косточки в масляной фракции и в осадке (образец № 17).

При обработке ягод сорта «Иня» по показателям «распределение частиц косточки и их размер» полуфабрикат набрал наименьшее количество баллов, по показателю «расслоение» образцы не имели гомогенную структуру даже при продолжительной температурной обработке (образцы № 18-20).

Установлено, что изменение реологических свойств продукта зависело от сорта облепихи и находилось в корреляционной зависимости от времени и температуры обработки:

• «наличие расслоения по фракциям (масляная/соковая/осадок)», (при  $R=0,5$ ), уравнение 1:

$$Y = 3,97 - 0,005X_1 - 0,052X_2, \quad (1)$$

где  $X_1$  – время обработки, мин;  $X_2$  – температура обработки,  $^\circ\text{C}$ .

• «распределение частиц косточки», (при  $R=0,8$ ), уравнение 2:

$$Y = 3,36 - 0,05X_1 - 0,009X_2, \quad (2)$$

где  $X_1$  – время обработки, мин;  $X_2$  – температура обработки,  $^\circ\text{C}$ .

По микробиологическим показателям полуфабрикаты соответствовали требованиям СанПиН 2.3.2.1078-01 «Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов» (рисунком 2).

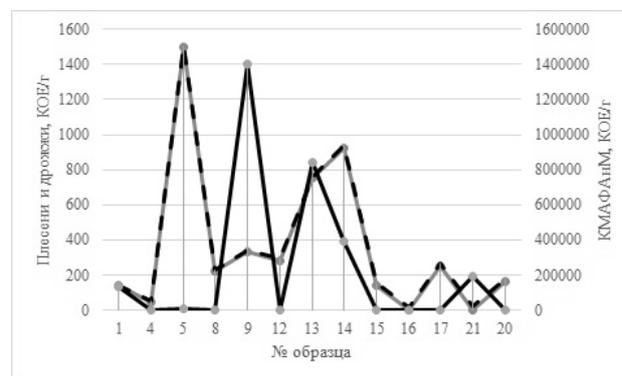


Рисунок 2 – Анализ по показателям «Плесени и дрожжи» и «КМАФАнМ», КОЕ/г

Отмечена динамика в образцах № 1, 5, 9, 13 и 21, подвергнутых минимальной технологической обработке в течении 1,5 минут при  $T = 26^\circ \text{C}$ . Снижение микробиоты по исследуемым показателям наблюдали

при длительной обработке с повышением температуры в диапазоне от 66 до 72° С (образцы №4, 8, 12-14), или при поддержании температуры на постоянном уровне с увеличением времени обработки (образцы № 14-17, 20).

Выводы. Согласно результатам исследования, получение полуфабриката из плодов облепихи при кавитационном воздействии рекомендуем сорт Гибрид 165-81-1, при соблюдении технологических параметров – T = 66-72° С продолжительностью 20-25 минут (погрешность 0,95%), сорта «Елизавета» и «Чечек» при технологических параметрах – T = 66-72° С более 20 минут, или T = 47-52° С (погрешность 0,95%) в течении 30 минут при постоянной температуре.

При соблюдении технологических параметров образцы обладали: гомогенной системой, устойчивой при хранении. Допускается отделение масляной фракции не более 5%, при дроблении, где размер косточки плодов находится в пределах от 1,01 до 2,00 см в диаметре, что определяет распределение частиц косточкой фракции по всему объему.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Брем А. Жизнь растений. Новейшая ботаническая энциклопедия. – М.: Из-во Эксмо, 2005. – 976 с.
2. Котова Т.И. Обоснование метода сушки плодов облепихи в микроволновой вакуумной установке / Т.И. Котова, Г.И. Хантургаева, Г.И. Хараев, Л.Е. Полякова // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2006. – №8. – С. 24.
3. Michel T. Evaluation of a simple and promising method for extraction of antioxidants from sea buckthorn (*Hippophaë rhamnoides* L.) berries: Pressurised solvent-free microwave assisted extraction/ T.Michel, E. Destandau, C.Elfaqir // Food Chemistry. – 2011. – №126. – PP 1380 – 1386.
4. Mendelova A. Evaluation of carotenoids, polyphenols content and antioxidant activity in the sea buckthorn fruit/ A. Mendelova, L/ Mendel, P. Czako, J. Marecek // Potravinarstvo Scientific Journal for Food Industry. – 2016. – Vol 10 (No 1). – PP. 59–64.
5. Mörsel J.-T. Seabuckthorn. Research for a promising crop: A look at recent developments in cultivation, breeding, technology, health and environment / J.-T. Mörsel, Y. Zubarev, D. Eagle. – Norderstedt: BoD. – Books on Demand, 2014. – 208 с.
6. Кошелев Ю.А., Агеева А.Д. Облепиха: монография. – Бийск: НИИЦБ ПГУ им. В.М. Шукшина, 2004. – 320 с.
7. Короткая Е.В. Исследование физико-химических показателей свежих и замороженных плодов облепихи / Е.В. Короткая, И.А. Короткий // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2008. – № 1. – С.116–117.
8. Ершова И.В. Оценка перспективных сортов облепихи алтайской селекции по содержанию токоферолов в плодах / И.В. Ершова, А.А. Бондарев, О.С. Еманова, В.В. Смирнов // Новые и нетрадиционные растения и перспективы их использования. – 2017. – С. 28–30.
9. Ершова И.В. Сортовое разнообразие алтайской облепихи по биохимическому составу плодов // Плодоводство и ягодоводство России. – 2012. – Т. 31. – № 1. – С. 163–170.
10. Земцова А. Я. Генетическая и биохимическая оценка сортообразцов облепихи различного эколого-географического происхождения в коллекции НИИ садоводства Сибири имени М.А. Лисавенко: дис. с.-х. техн. наук / А.Я. Земцова. – Барнаул, 2017. – 171 с.
11. Пат. RU 2245077 A23L 1/30 (Российская Федерация) Пищевой продукт из семян облепихи / Т.Ф. Чиркина, А.М. Золотарева, Г.В. Габанова; заявитель и патентообладатель Восточно-Сибирский государственный технологический университет. – № 2003119999/13, заявл. 01.07.2003; опубл. 27.01.2005, Бюл. № 3.
12. Патент RU 2454880 A23L 2/00 (Российская Федерация) Способ получения концентрата облепихи / Е.В. Алексеенко, С.Е. Траубенберг, Ю.М. Дикарева, Н.В. Осташенкова Наталия Васильевна, заявитель и патентообладатель Е.В. Алексеенко. – 2010152040/13, заявл. 21.12.2010, опубл. 10.07.2012, Бюл. № 19.
13. Патент RU 2541381 A23L 1/06, A23B 7/08 (Российская Федерация) Облепиха протертая с сахаром / С.А. Мухортов; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Научно-производственная фирма "Алтайский букет". – 2013132100/13, заявл. 10.07.2013, опубл. 10.02.2015 Бюл. № 3.
14. Патент RU 2490916 A23B 7/08, A23L 2/02, A23L 2/70 Способ переработки плодов облепихи / Г.М. Скуридин, Г.Ю. Галицын, В.К. Креймер; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук (ИЦиГ СО РАН). – 2012122666/13, заявл. 01.06.2012, опубл. 27.08.2013 Бюл. № 24.
15. Пат. 2586924 Российская Федерация, МПК A23L21/10. Способ получения джема и полуфабриката из плодов облепихи / О.К. Мотовилов, К.Я. Мотовилов, К.Н. Нициевская; заявитель и патентообладатель ГНУ СибНИИП Россельхозакадемии. – 2014122512/13; заявл. 03.06.2014; опубл. 10.06.2016. – 4 с.
16. СанПиН 2.3.2.1078-01 «Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов».
17. ГОСТ 26669-85 Продукты пищевые и вкусовые. Подготовка проб для микробиологических анализов (с Изменением N 1). – Введ. 30.06.1986. – М.: Стандартинформ, 2010. – 9 с.
18. ГОСТ 10444.15-94 Продукты пищевые. методы определения количества мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов. – Введ. 21.02.1995. – М.: Стандартинформ, 2010. – 7 с.
19. ГОСТ 31659-2012 Продукты пищевые. метод выявления бактерий рода Salmonella. – Введ. 09.11.2012. – М.: Стандартинформ, 2014. – 25 с.
20. ГОСТ 31747-2012 Продукты пищевые. методы выявления и определения количества

бактерий группы кишечных палочек (колиформных бактерий). – Введ. 29.11.2012. – М.: Стандартиформ, 2013. – 20 с.

21. ГОСТ 10444.12-2013 Микробиология пищевых продуктов и кормов для животных. Методы выявления и подсчета количества дрожжей и плесневых грибов. – Введ. 22.11.2013. – М.: Стандартиформ, 2014. – 12 с.

*Статья поступила в редакцию 15.01.2018*

*Статья принята к публикации 05.03.2018*

УДК 604

## ИССЛЕДОВАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ АНТИОКСИДАНТОВ В ОВОЩАХ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

© 2018

**Смоленцева Алла Алексеевна**, кандидат технических наук, доцент,  
доцент Высшей школы биотехнологии и пищевых технологий

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*  
(194021, Россия, Санкт-Петербург, ул. Новороссийская 48, e-mail: smolentseva\_aa@spbstu.ru)

**Елисеева Светлана Анатольевна**, кандидат технических наук, доцент Высшей школы биотехнологии  
и пищевых технологий

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*  
(194021, Россия, Санкт-Петербург, ул. Новороссийская 48, e-mail: eliseeva\_sa@spbstu.ru)

**Котова Наталья Петровна**, кандидат технических наук, доцент, доцент Высшей школы биотехнологии  
и пищевых технологий

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*  
(194021, Россия, Санкт-Петербург, ул. Новороссийская 48, e-mail: kotova\_np@spbstu.ru)

**Аннотация.** В статье рассмотрена эффективность применения овощных полуфабрикатов, сушеных овощей и растительных криопорошков с целью обогащения антиоксидантами при проектировании функциональных пищевых продуктов. Определение суммарного содержания антиоксидантов (ССА) в свежих овощах и полуфабрикатах из них при холодильном хранении проводили кулонометрическим методом по аскорбиновой кислоте. Определяли ССА в свежих овощах: свекле – 1,42; моркови – 0,81; луке репчатом – 1,56 мг/г. Потери ССА при обработке полуфабрикатов из овощей в вакуумных герметичных пакетах при 95° С составили: в свекле – 16,9; моркови – 35,4; луке репчатом – 20,6%. Выявлена динамика снижения ССА через 7, 14 и 21 сутки холодильного хранения для полуфабрикатов из свеклы – 66,7; 68,1; 84,2%; моркови – 50,2; 75,3; 91,1%; лука репчатого – 64,9, 75,4; 90,2% соответственно. Исследования ССА в сушеных овощах и криопорошках проводили амперометрическим методом по кверцетину. Результаты определения ССА в криопорошках сопоставимы с данными по аналогичным полуфабрикатам из овощей, а в сушеных овощах превышают данные по свежим овощам в 1,1- 6,3 раза в пересчете на сухой вес. Определены минимальные количества свежих, термообработанных и сушеных овощей в функциональном продукте питания. Даны рекомендации по совершенствованию технологии формованных изделий из птицы с сушеными овощами в качестве наполнителей и сладких блюд с криопорошками. Добавление сушеных овощей в количестве 1,1-3,5% и криопорошков в количестве 3,7-8,2% на 100 г продукта позволяет считать продукт функциональным.

**Ключевые слова:** суммарное содержание антиоксидантов, овощные полуфабрикаты, растительные криопорошки, функциональные пищевые продукты.

## INVESTIGATION OF THE TOTAL AMOUNT OF ANTIOXIDANTS IN VEGETABLES FOR IMPROVEMENT OF TECHNOLOGY OF FUNCTIONAL FOODSTUFFS

© 2018

**Smolentseva Alla Alekseevna**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Higher School of Biotechnology and Food Technologies

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*  
(194021, Russia, St. Petersburg, Novorossiyskaya ul., 48, e-mail: smolentseva\_aa@spbstu.ru)

**Eliseeva Svetlana Anatolyevna**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor  
Higher School of Biotechnology and Food Technologies

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*  
(194021, Russia, St. Petersburg, Novorossiyskaya ul., 48, e-mail: eliseeva\_sa@spbstu.ru)

**Kotova Natalya Petrovna**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Higher School of Biotechnology and Food Technologies

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*  
(194021, Russia, St. Petersburg, Novorossiyskaya ul., 48, e-mail: kotova\_np@spbstu.ru)

**Abstract.** The article deals with the efficiency of application of vegetable semifinished products, dried vegetables and vegetable cryopowders with the purpose of enriching them with antioxidants while designing functional food products. Determination of the total content of antioxidants (TCA) in fresh vegetables and semi-finished products made from them during refrigerated storage was carried out with the help of the coulometric method in ascorbic acid. The TCA in fresh vegetables: beets – 1.42; carrots – 0.81; onion – 1.56 mg / g. The loss of TCA in the processing of semi-finished products from the vegetables in vacuum sealed bags at 95°C was: beet – 16.9; carrots – 35.4; onion – 20.6%. The dynamics of the decrease in the SSA was determined on the 7th, 14th and 21st days of the cold storage for beet half-products – 66.7; 68.1; 84.2%; carrots half-products – 50.2; 75.3; 91.1%; onion half-products – 64.9, 75.4; 90.2% respectively. The SSA studies in dried vegetables and cryopowders were carried out by amperometric method in quercetin. The results of the determination of SSA in cryopowders are comparable with those of similar semi-finished products

from vegetables, and in dried vegetables exceed the data for fresh vegetables by 1.1–6.3 times on a dry basis. The minimum quantities of fresh, heat-treated and dried vegetables in a functional food product are determined. Recommendations are given for improving the technology of molded poultry products with dried vegetables as fillers and sweet dishes with cryopowders. The addition of dried vegetables in the amount of 1.1–3.5% and cryopowders in an amount of 3.7–8.2% per 100 g of product allows the product to be considered functional.

**Keywords:** the total content of antioxidants, vegetable semi-finished products, vegetable cryopowders, functional food products.

Переход пищевых производств на новую индустриальную базу требует разработки функциональных и специализированных продуктов с повышенной пищевой ценностью и продленными сроками годности [1]. В последние годы появляется все больше отечественных разработок пищевых продуктов с функциональными свойствами, обусловленными введением в их состав овощей – источников антиоксидантов. Наряду с этим, широкое применение получили овощные ингредиенты с пониженной влажностью (сушеные овощи), а также мелкодисперсные растительные криопорошки, получаемые методом сушки и измельчения при низких температурах. Криотехнология позволяет предотвратить процессы окисления и карамелизации сырья, на стадии удаления влаги происходит концентрация биологически активных веществ [2].

Современные данные в области биохимии растений показывают, что овощи являются незаменимыми источниками минорных биологически активных соединений, оказывающих антиоксидантное действие на организм [3,4]. Основные и самые эффективные антиоксиданты – природные водорастворимые полифенолы. Среди них наиболее многочисленную группу составляют флавоноиды, которые можно разделить на семь основных групп: флавоны, флаваноны, флаванолы, флаванолы, изофлавоны, катехины и антоцианидины. В растениях они находятся в виде веществ различной степени полимеризации. Считается, что рацион, богатый флавоноидами, способствует защите организма от сердечнососудистых, некоторых видов онкологических заболеваний, а также от нейродегенеративных расстройств. Одним из распространенных флавоноидов является кверцетин, содержащийся в винограде, вине, чае, яблоках, листовых зеленых овощах, репчатом луке др. Он обладает противовоспалительным эффектом и является мощным антиоксидантом [5].

К жирорастворимым антиоксидантам относятся токоферолы, каротиноиды, ретинол. Жирорастворимые антиоксиданты защищают от свободных радикалов биомембраны, их липидные структуры. При сочетании некоторых антиоксидантов с другими соединениями может наблюдаться как синергетический, так и эффект ингибирования.

К антиоксидантам растений семейства луковых относят отдельную группу – сульфиды. Серо-содержащие биоактивные соединения овощей рода луковых ингибируют рост раковых клеток, стимулируют активность детоксицирующих ферментов, укрепляют иммунную систему организма, защищают его от окислительных повреждений [6].

В научной литературе приводятся данные об антиоксидантном действии растительных пигментов. К ним относятся беталаиновые пигменты свеклы [7]. По сравнению с другими странами, культивирующими столовую свеклу, главным образом, как источник натурального красителя и компонента кормов для животных [6], в России она прочно занимает место в повседневном рационе населения. В настоящее время известно, что беталаины являются ароматическими производными индола, синтезированного из тирозина. Химически беталаины не связаны с антоцианами, которые относятся к флавоноидам [8].

Согласно действующим нормам физиологических потребностей [9] биологически активные соединения должны поступать в организм человека вне зависимости от сезона. Специальная литература свидетельствует об интересе специалистов к вопросу динамики антиоксидантных свойств овощей. К наиболее часто изучаемым факторам, влияющим на изменение суммарного содержания антиоксидантов (ССА), относят вид, сорт, степень созревания, химический состав овощей. Гораздо реже встречаются данные о влиянии способа кулинарной обработки. Практически отсутствуют данные об изменениях ССА в овощах и продукции из них при хранении. Поэтому изучение динамики ССА овощей разной степени переработки, в том числе, при холодильном хранении, является актуальным и практически важным направлением.

Цель данной работы – исследование суммарной антиоксидантной активности овощных полуфабрикатов и продуктов промышленной переработки из них и возможности создания на их основе функциональных пищевых продуктов. Для реализации поставленной цели решались следующие задачи: определение суммарного содержания антиоксидантов в растительных объектах; определение минимальной доли растительного компонента в функциональном пищевом продукте.

**Объекты исследования.** В качестве объектов исследования использовали товарные партии свежих овощей (морковь, свекла, лук репчатый); полуфабрикаты из овощей, упакованные в вакуумные герметичные пакеты: морковь, свекла, лук репчатый (через 0, 7, 14, 21 сутки холодильного хранения при температуре 2...6° С); сушеные овощи: морковь, свекла, лук репчатый, высушенные в лабораторных условиях в сушильном шкафу при температуре 60° С до содержания массовой доли влаги в продукте не выше 14% (ГОСТ 32065); криопорошки из растительного сырья (ТУ 9164-001-97572157-2014): морковь, свекла, чернослив после хранения в условиях розничной торговли от 2 до 6 месяцев.

**Методы исследования.** Для определения ССА в свежих овощах и полуфабрикатах из них в процессе холодильного хранения применяли кулонометрический метод в соответствии с сертифицированной методикой (МВИ.01-44538054-07) с использованием серийного кулонометра «Эксперт-006». Сущность метода заключается в том, что в ходе титрования определяют все антиоксиданты, внесенные с анализируемой пробой и реагирующие с электрогенерируемыми радикалами избытка брома, численно равного количеству внесенных с пробой антиоксидантных веществ. Конечную точку титрования прибор фиксирует по достижению первоначального значения индикаторного потенциала (5-50 мА, в зависимости от суммарного содержания антиоксидантов в пробе – от 0 до 100 мг). Для одного анализа отбирали по 5 параллельных проб. В качестве стандарта использовали аскорбиновую кислоту.

ССА растительных объектов рассчитывали в количестве электричества (кулоны), затрачиваемого на 100 см<sup>3</sup> жидкой пробы (экстракта) по формуле (1):

$$Q = \frac{100 \cdot J \cdot t}{V}, \quad (1)$$

где  $J$  – сила тока 50 мА;

$t$  – время достижения конечной точки титрования, с;

$V$  – объем аликвоты, см<sup>3</sup>.

Суммарную антиоксидантную активность в пересчете на мкг аскорбиновой кислоты на 100 см<sup>3</sup> жидкой пробы вычисляли по формуле (2):

$$X = K \cdot Q, \quad (2)$$

где  $Q$  – суммарная антиоксидантная активность анализируемой пробы в кулонах;

$K$  – коэффициент пересчета, который определяли при калибровке электролитической ячейки кулонометра (в мкг аскорбиновой кислоты на 1 кулон).

Объем вводимой аликвоты для всех образцов составил 2,0 см<sup>3</sup>, коэффициент пересчета на аскорбиновую кислоту – 0,004.

Для определения ССА в сушеных овощах и растительных криопорошках применяли амперометрический метод, основанный на измерении электрического тока, возникающего при электрохимическом окислении исследуемого вещества на поверхности электрода при определенном его потенциале [10]. В условиях амперометрического детектирования хорошо окисляются соединения, содержащие гидроксильную группу, предел их обнаружения лежит в интервале 10<sup>-9</sup> – 10<sup>-10</sup>. Прямое количественное измерение в пробах проводили на приборе Цвет Яуза-01-АА. Проверка проб, проведение эксперимента и обработка результатов проводилась в соответствии с ГОСТ Р 54037 [11]. С помощью программного обеспечения производили расчет площадей (высот пиков) анализируемого и стандартного вещества. Для анализа использовали среднее значение из 5 последовательных измерений. В качестве стандартного вещества был использован раствор кверцетина. Градуировочная характеристика анализатора представлена на рисунке 1 в виде линейной зависимости

среднеарифметических значений выходного сигнала от массовой концентрации кверцетина с корреляцией не ниже 0,98.

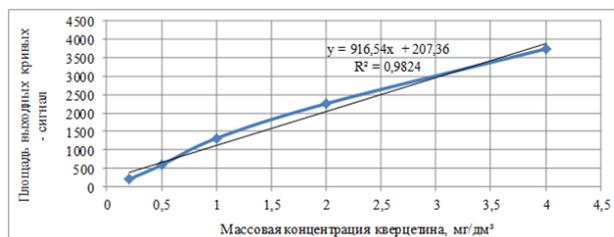


Рисунок 1 – График зависимости сигнала от концентрации кверцетина в растворе

Суммарное содержание антиоксидантов в пробе СА, мг/г, вычисляли по формуле (3):

$$CA = \frac{CA_k \cdot V_n \cdot N}{m_n \cdot 1000}, \quad (3)$$

где  $CA_k$  – суммарное содержание антиоксидантов (в пересчете на кверцетин), определенное с использованием градуировочной характеристики, мг/дм<sup>3</sup>;

$V_n$  – объем раствора анализируемой пробы, дм<sup>3</sup>;

$N$  – кратность разбавления анализируемой пробы;

$m_n$  – навеска анализируемого вещества, г.

Массовую долю влаги в исследуемых объектах определяли по ГОСТ 28561 [12] методом высушивания до постоянной массы.

**Результаты исследования.** Термическую обработку нарезанных и упакованных в полимерные герметичные пакеты с помощью вакуумирования полуфабрикатов из овощей проводили в пароконвекционном аппарате при температуре 95° С, влагосодержании 90%. ССА в растительных объектах представлено в таблице 1.

Таблица 1 – ССА в свежих овощах и в полуфабрикатах из них в процессе холодильного хранения

№ п/ п	Наименование объектов	ССА, мкг/см <sup>3</sup> по аскорбиновой кислоте				
		Свежие овощи	Полуфабрикаты из овощей	в процессе холодильного хранения, сут		
				7	14	21
1	Свекла	284,2± 5,7	236,1± 5,2	94,6± 3,2	44,9± 2,1	28,6± 1,3
2	Морковь	160,0± 8,7	103,4± 6,5	79,7± 4,9	39,5± 1,9	14,3± 0,8
3	Лук репчатый	300,2± 8,2	238,5± 7,6	105,5± ±3,9	73,7± 2,0	29,4± 0,9

Согласно данным, приведенным в таблице 1, видно, что термическая обработка упакованных в вакуумные пакеты овощей приводит к снижению ССА по сравнению с исходными свежими продуктами: в термообработанной свекле потери ССА составили – 16,9; моркови – 35,4; луке репчатом – 20,6%.

Через 7, 14 и 21 сутки холодильного хранения динамика снижения ССА составила для полуфабрикатов из свеклы – 66,7; 68,1; 84,2%; моркови – 50,2; 75,3; 91,1%; лука репчатого – 64,9; 75,4; 90,2% соответственно.

ССА в исследуемых растительных объектах в пересчете на сухое вещество, с учетом согласования единиц измерения и в зависимости от вида анализируемой пробы, представлено в таблице 2.

Таблица 2 – ССА в свежих овощах, полуфабрикатах из них при хранении, сушеных овощах и растительных криопорошках

№ п/п	Наименование объектов	ССА в пробе, мг/г	Массовая доля сухих веществ в продукте, %	ССА в пробе в пересчете на сухое вещество, мг/г
1.	Свекла свежая	1,42±0,04	13,0	10,9
2.	Морковь свежая	0,81±0,02	9,7	8,4
3.	Лук репчатый свежий	1,56±0,04	10,3	16,1
4.	Полуфабрикат из свеклы, 0 сут.	1,18±0,03	12,5	9,4
5.	Полуфабрикат из моркови, 0 сут.	0,53±0,02	9,9	5,4
6.	Полуфабрикат из лука репчатого, 0 сут.	1,24±0,04	10,3	12,0
7.	Полуфабрикат из свеклы, 14 сут.	0,23±0,01	11,9	1,9
8.	Полуфабрикат из моркови, 14 сут.	0,20±0,01	9,6	2,1
9.	Полуфабрикат из лука репчатого, 14 сут.	0,39±0,01	10,2	3,8
10.	Свекла сушеная	16,0±0,9	88,9	18,0
11.	Морковь сушеная	47,1±1,8	88,2	53,4
12.	Лук сушеный	15,4±0,8	87,5	17,6
13.	Криопорошок из свеклы	8,2±0,6	95,9	8,6
14.	Криопорошок из моркови	6,1±0,4	96,2	6,3
15.	Криопорошок из чернослива	13,4±0,9	95,1	14,1

Динамика суммарного содержания антиоксидантов в исследуемых растительных объектах обусловлена видами овощей, природой антиоксидантов, степенью переработки овощного сырья. Сравнительный анализ данных показал сопоставимость ССА в термообработанных в вакууме овощах и криопорошках из овощей. В обоих случаях используются щадящие температурные режимы обработки, способствующие высокой сохранности ССА.

Более высоким содержанием антиоксидантов отличаются сушеные овощи, особенно морковь. Известны данные о влиянии высушивания овощей на содержание в них общих растворимых фенольных соединений, аскорбиновой кислоты, общего содержания каротиноидов, антоцианов, способность поглощать свободные радикалы. Сушка оказала неоднозначное влияние на все показатели, так, в краснокочанной капусте было отмечено снижение ССА, а в моркови – увеличение [13, 14].

Рекомендуемые уровни потребления некоторых флавоноидов составляют суммарно 350 мг/сут [8]. Пищевой продукт считается специализированным или функциональным, если содержание биологически активного вещества в 100 см<sup>3</sup> или 100 г, или разовой порции пищевого продукта составляет не менее 15% от уровня рекомендуемого суточного потребления [15]. В таблице 3 приведено минимальное количество вводимого ингредиента из овощей в разовую порцию функционального продукта питания.

Таблица 3 – Степень удовлетворения суточной нормы потребления антиоксидантов за счет продуктов переработки овощей

Наименование объектов	Количество продукта, обеспечивающее суточную норму антиоксидантов, г	Минимальное количество продукта в функциональном продукте питания, г
Свекла свежая	246,5	37,0
Морковь свежая	432,1	64,8
Лук репчатый свежий	224,3	33,7
Полуфабрикат из свеклы, 0 сут.	296,6	44,5
Полуфабрикат из моркови, 0 сут.	660,4	99,1
Полуфабрикат из лука репчатого, 0 сут.	282,3	42,3
Полуфабрикат из свеклы, 14 сут.	1521,7	228,3
Полуфабрикат из моркови, 14 сут.	1750,0	262,5
Полуфабрикат из лука репчатого, 14 сут.	897,4	134,6
Свекла сушеная	19,6	2,9
Морковь сушеная	7,5	1,1
Лук сушеный	22,7	3,4
Криопорошок из свеклы	40,9	6,1
Криопорошок из моркови	55,2	8,2
Криопорошок из чернослива	24,8	3,7

Использование полуфабрикатов из овощей в вакуумной упаковке позволяет готовить традиционные блюда русской кухни, обогащенные антиоксидантами. К ним относятся: салаты из свеклы, винегреты, гарниры из моркови и свеклы с выходом

порции 100 г, борщи с выходом порции 200 г. Рекомендованные сроки хранения полуфабрикатов из овощей в условиях холода приводят к значительным потерям их антиоксидантной активности, поэтому тот же ассортимент блюд теряет свою функциональную направленность.

Обогащенные антиоксидантами продукты разных ассортиментных групп можно создавать, добавляя сушеные овощи и криопорошки в небольших количествах: 1,1–3,5% и 3,7–8,2% на 100 г продукта соответственно. Разработаны технологии рубленых изделий из птицы с сушеными овощами в качестве наполнителя [16, 17, 18]. Предложены технологии десертных муссов и кремов с криопорошком из чернослива [19, 20].

Выводы. Применение инновационных технологий обработки овощного сырья (термообработка в вакууме, сушка при пониженных температурах, криосушка) позволяет максимально сохранить активность природных антиоксидантов. Проведенные исследования ССА овощных продуктов положены в основу проектирования функциональных пищевых продуктов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Стратегия повышения качества пищевой продукции в Российской Федерации до 2030 года, утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 29 июня 2016 года № 1364-р. ([www.pravo.gov.ru](http://www.pravo.gov.ru)) (от 29.06.2016 г. Номер опубликования: 0001201607050014).
2. Касьянов, Г.И. Производство и использование криопорошков из овощей и фруктов / Г.И. Касьянов, В.В. Ломачинский // Известия ВУЗов. Пищевая технология. – 2010. – № 2-3. – С. 64–65.
3. Голубкина, Н.А. Биологически активные соединения овощей / Н.А. Голубкина, С.М. Сирота, В.Ф. Пивоваров и др.; Под ред. акад. В. Ф. Пивоварова; М.: Изд-во ВНИИССОК. – 2010. – 199 с.
4. Химический состав российских пищевых продуктов: Справочник. – Под ред. член-корр. МАИ, проф. Скурихина И.М. и академика РАМН, проф. Тутельяна В.А. М.: ДеЛи принт, 2002. – 236 с.
5. Базарнова, Ю.Г. Биологически активные вещества дикорастущих растений и их применение в пищевых технологиях: Учеб. пособие / Ю.Г. Базарнова. – СПб.: Профессия. – 2016. – 240 с.
6. Химия пищевых продуктов: Научное издание: Пер. с англ. / ред., сост.: Ш. Дамодаран, К.Л. Паркин, О.Р. Феннема. – СПб.: Профессия. – 2012. – 1040 с.
7. Бриттон, Г. Биохимия природных пигментов: Пер. с англ. – М.: Мир. – 1986. – 422 с.
8. Stintzing, F.C. Betalains e emerging prospects for food scientists / F.C. Stintzing, R. Carle // Trends in Food Science & Technology. 2007. Vol.18. No.10. P.514-525.
9. Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации. Методические рекомендации 2.3.1.2432-08. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. – 2009. – 36 с.
10. Яшин, Я.И. Природные антиоксиданты. Содержание в пищевых продуктах и влияние их на здоровье и

старение человека / Я.И. Яшин, В.Ю. Рыжнев, А.Я. Яшин, Н.И. Черноусова. – Транслит, 2009. – 212 с.

11. ГОСТ Р 54037–2010 Продукты пищевые. Определение содержания водорастворимых антиоксидантов амперометрическим методом в овощах, фруктах, продуктах их переработки, алкогольных и безалкогольных напитках. М.: Стандартинформ, – 2011. – 12 с.

12. ГОСТ 28561–90 Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения сухих веществ или влаги. М.: Стандартинформ, – 2011. – 11 с.

13. Reyes, F.L. The increase in antioxidant capacity after wounding depends on the type of fruit or vegetables tissue / F.L. Reyes // Food Chem. – 2007. – V.101, № 1. – P. 68–74.

14. Nistor, O.V. Influence of different drying methods on the physicochemical properties of red beetroot (*Beta vulgaris* L. var. *Cylindra*) / O.V. Nistor, L. Seremet (Ceclu), D.G. Andronoiu et al. // Food Chemistry. – 2017. – V. 236. – P. 59–67.

15. ГОСТ Р 55577 – 2013 Продукты пищевые специализированные и функциональные. Информация об отличительных признаках и эффективности (с Изменением № 1). М.: Стандартинформ, – 2014. – 19 с.

16. Елисеева, С.А. Совершенствование технологии формованных изделий функционального назначения. Материалы V Международного Балтийского морского форума. Ч. 8. – Калининград: Изд-во БГАРФ. – 2017. – С. 44–46.

17. Елисеева, С.А. Определение антиоксидантной активности в сушеных овощах амперометрическим методом / С.А. Елисеева, А.А. Дьякова, К.С. Чуйкова. Неделя науки СПбПУ: материалы науч. конф. с межд. уч. Выс. шк. биотехн. и пищ. техн. – СПб.: Изд. Политехн. ун-та. – 2017. – С.63–65.

18. Елисеева С. А. Исследование антиоксидантных свойств сушеных овощей / С.А. Елисеева, А.А. Дьякова, К.С. Чуйкова. Материалы XII российского форума с международным участием «Здоровое питание с рождения: медицина, образование, пищевые технологии», 9–10 ноября 2017 г. – СПб, 2017, С. 39–41.

19. Смоленцева А. А. Разработка функциональных десертов с использованием растительных криопорошков / А.А. Смоленцева, Е.А. Поликарпова. Материалы XII российского форума с международным участием «Здоровое питание с рождения: медицина, образование, пищевые технологии», 9–10 ноября 2017 г. – СПб. – 2017. – С. 96–97.

20. Поликарпова, Е.А. Исследование антиоксидантных свойств растительных криопорошков / Е.А. Поликарпова, А.А. Смоленцева. Неделя науки СПбПУ: материалы науч. конф. с межд. уч. Выс. шк. биотехн. и пищ. техн. – СПб.: Изд. Политехн. ун-та. – 2017. – С.92–95.

*Статья поступила в редакцию 01.02.2018*

*Статья принята к публикации 14.03.2018*

УДК 621.794

## ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ОКСИДИРОВАНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

© 2018

**Чуфистов Олег Евгеньевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения»  
*Пензенский государственный технологический университет*  
(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/улица Гагарина, 1а/11, e-mail: kurator06m2@mail.ru)

**Чуфистов Евгений Алексеевич**, кандидат технических наук, профессор кафедры «Транспортные машины»  
*Пензенский государственный университет*  
(440026, Россия, Пенза, улица Красная, 40, e-mail: ea\_tchufistov@mail.ru)

**Аннотация.** В начале статьи отмечена необходимость улучшения эксплуатационных характеристик оборудования пищевой промышленности. Показано, что алюминиевые сплавы, благодаря уникальному сочетанию свойств, являются перспективными материалами для изготовления оборудования пищевой промышленности. Выявлено, что оксидирование в растворах электролитов позволяет получать на поверхностях изделий из алюминиевых сплавов многофункциональные покрытия. Рассмотрены основные разновидности электрохимического оксидирования – традиционное анодирование и микродуговое оксидирование. Установлены важнейшие особенности протекания традиционного анодирования и микродугового оксидирования, определяющие структуру и свойства формируемых покрытий. Доказано, что покрытия, формируемые традиционным анодированием, имеют повышенную коррозионную стойкость, а покрытия, формируемые микродуговым оксидированием, имеют повышенные механические и электроизоляционные свойства. Выявлена возможность дополнительного повышения коррозионной стойкости покрытий с помощью наполнения в кислых и щелочных кипящих водных растворах. Отмечена возможность использования покрытий в качестве подложки для лакокрасочных материалов. Обоснована целесообразность применения электрохимического оксидирования для обработки элементов технологического оборудования пищевой промышленности для улучшения его эксплуатационных характеристик. В заключительной части статьи приведены примеры успешного применения электрохимического оксидирования для обработки технологического оборудования пищевой промышленности.

**Ключевые слова:** оборудование пищевой промышленности, алюминиевые сплавы, электрохимическое оксидирование, покрытия, наполнение, износостойкость, электрическое сопротивление, напряжение пробоя, коррозионная стойкость, декоративные свойства

## APPLICATION OF ELECTROCHEMICAL OXIDATION FOR TREATMENT OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT ELEMENTS OF FOOD INDUSTRY

© 2018

**Tchufistov Oleg Evgenevich**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Technology of Machine Building»

*Penza State Technological University*  
(440039, Russia, Penza, Baydukov proezd /Gagarin ul., 1a/11, e-mail: kurator06m2@mail.ru)

**Tchufistov Evgenij Alekseevich**, PhD in Technical Sciences, Professor of the Department «Transport Machines»  
*Penza State University*

(440026, Russia, Penza, Krasnaya ul., 40, e-mail: ea\_tchufistov@mail.ru)

**Abstract.** At the beginning of the article the necessity to improve operational characteristics of food industry equipment is noted. It is shown that aluminum alloys, thanks to a unique combination of properties, are promising materials for manufacture of food industry equipment. It is revealed that oxidation in solutions of electrolytes allows to obtain multifunctional coatings on surfaces of products from aluminum alloys. Main types of electrochemical oxidation – traditional anodizing and microarc oxidation are considered. Most important features of traditional anodizing and microarc oxidation which determine structure and properties of formed coatings are established. It is proved that coatings formed by traditional anodizing have increased corrosion resistance, and coatings formed by microarc oxidation have increased mechanical and electrical insulating properties. Possibility of additional increase of corrosion resistance of coatings by filling in acidic and alkaline boiling aqueous solutions is revealed. Possibility of using coatings as a substrate for paint and varnish materials is noted. Feasibility of application of electrochemical oxidation for processing elements technological equipment of food industry for improvement of operational properties is justified. The final part of the article contains examples of successful application of electrochemical oxidation for processing of food industry technological equipment.

**Keywords:** food industry equipment, aluminum alloys, electrochemical oxidation, coatings, filling, wear resistance, electrical resistance, breakdown voltage, corrosion resistance, decorative properties

Развитие пищевой промышленности требует постоянного совершенствования применяемого в ней технологического оборудования и средств оснащения, улучшения их эксплуатационных характеристик [1, 2]. Решение данной задачи требует комплексного подхо-

да, использования широкого спектра прогрессивных научных разработок, к числу которых относятся и разработки в области модифицирования поверхностей. При производстве современного технологического оборудования пищевой промышленности широко

применяются алюминиевые сплавы. Эти материалы имеют высокие тепло- и электропроводность, удовлетворительные прочность, износостойкость и коррозионную стойкость, малую плотность, отличаются хорошей способностью к формоизменению путем литья, давления и резания. Детали из алюминиевых сплавов можно соединять в различных конструкциях с помощью сварки, пайки и склеивания [3, 4].

Одним из эффективных путей модифицирования поверхности деталей и сборочных единиц, изготовленных из алюминиевых сплавов, является применение электрохимического оксидирования в растворах электролитов. Оно позволяет получать на модифицируемых поверхностях покрытия, преимущественно образующиеся в результате взаимодействия алюминия поверхностных слоев деталей и кислорода, выделяющегося из растворов, и имеющие уникальный комплекс физико-механических свойств [5, 6].

В связи с изложенным выше представляется перспективным применение электрохимического оксидирования для усовершенствования технологического оборудования пищевой промышленности путем модифицирования его поверхностей, повышения их важнейших эксплуатационных характеристик. Однако реализация такого подхода требует всестороннего исследования процесса электрохимического оксидирования, строения и свойств формируемых покрытий.

Электрохимическое оксидирование в растворах электролитов, как правило, реализуется согласно схеме, приведенной на рисунке 1. В гальваническую ванну 1, заполненную раствором электролита, погружаются обрабатываемая деталь 2 и противоэлектрод 4, представляющий собой пластину из нержавеющей стали (также в качестве противоэлектрода можно использовать ванну, если она изготовлена из нержавеющей стали). При создании постоянной или переменной разности потенциалов между деталью и противоэлектродом через раствор протекает электрический ток. В моменты, когда деталь является анодом, около ее поверхности выделяется кислород. Он взаимодействует с алюминием детали, образуя оксид, который выступает основой формируемого покрытия. Для постоянного обновления раствора около поверхностей детали используют миксер 3, а для предотвращения нагрева раствора выделяющимся джоулевым теплом между двойными стенками ванны пропускается холодная водопроводная вода [7,8].

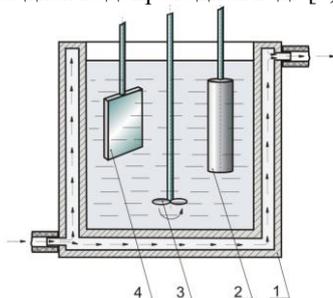


Рисунок 1 – Схема реализации электрохимического оксидирования в растворах электролитов:  
1 – ванна с раствором; 2 – обрабатываемая деталь;  
3 – миксер; 4 – противоэлектрод

Среди методов электрохимического оксидирования алюминиевых сплавов в растворах электролитов наиболее широкое распространение в производственной практике получили традиционное анодирование (ТА) и микродуговое оксидирование (МДО). ТА, как правило, реализуется в кислых растворах при постоянном токе, когда обрабатываемая деталь постоянно является анодом. МДО преимущественно реализуется в щелочных средах в присутствии веществ, обеспечивающих пассивацию оксидируемых поверхностей, при переменном токе, когда деталь попеременно является анодом и катодом. Кроме того, ТА протекает при напряжении  $U=25...100$  В и плотности тока на поверхности оксидируемой детали  $j=1...4$  А/дм<sup>2</sup>, МДО – при напряжении  $U=150...600$  В и плотности тока  $j=10...40$  А/дм<sup>2</sup>, поэтому потребляемая мощность в процессе МДО в десятки раз выше, чем в процессе ТА, а стоимость обработки методом МДО на порядок выше себестоимости обработки методом ТА [7, 9].

Параметры электрохимического оксидирования определяют структуру, фазовый состав и свойства формируемых покрытий. Покрытия, формируемые на алюминиевых сплавах методом ТА (ТА-покрытия), являются преимущественно стеклообразными, их основу составляет аморфный оксид алюминия, толщина не превышает 100 мкм, а относительная пористость находится в пределах 1,0...3,5%. Покрытия, формируемые методом МДО (МДО-покрытия), имеют преимущественно поликристаллическое строение, их основу составляют твердые и прочные модификации кристаллического оксида алюминия  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, толщина может достигать 300 мкм и более, а относительная пористость находится в пределах 4,0...7,5% [7, 10].

Химический состав оксидируемых алюминиевых сплавов во многом определяет особенности строения и фазовый состав формируемых на них покрытий. Повышение содержания в сплавах таких элементов как медь, железо, марганец, цинк, кремний вызывает снижение толщины и повышение пористости покрытий, а также уменьшение содержания в них кристаллического оксида алюминия [11, 12].

В таблицах 1 и 2 представлены результаты лабораторных исследований свойств ТА- и МДО-покрытий, приведены средние значения толщины, твердости в средней зоне, линейного износа по абразивному контролю, напряжения пробы и электрического сопротивления ТА- и МДО-покрытий, а также значения скорости их коррозии в растворе уксусной кислоты. При этом, ТА-покрытия были получены в растворе щавелевой кислоты (30 г/л) в течение 45 минут на постоянном токе при температуре раствора  $20\pm 2^\circ$  С и анодной плотности тока  $2,5\pm 0,2$  А/дм<sup>2</sup>, а МДО-покрытия были получены в растворе едкого кали (5 г/л) и низкомолекулярного жидкого стекла (5 г/л) в течение 90 минут с использованием переменного тока при температуре раствора  $20\pm 2^\circ$  С и анодной плотности тока  $25\pm 2$  А/дм<sup>2</sup>.

Данные приведенных таблиц показывают, что по механическим и диэлектрическим свойствам ТА-покрытия существенно уступают МДО-покрытиям, но значительно превосходят их по коррозионной стойкости. При этом,

коррозионную стойкость ТА- и МДО-покрытий можно повысить на 10...12% дополнительной обработкой – наполнением, заключающимся в выдержке изделий с покрытиями в кипящих слабокислых или слабощелочных водных растворах и позволяющим в снижать пористость на 15...45% с нейтрализацией соответственно щелочного или кислотного остатка в порах [13-15].

Таблица 1 – Показатели свойств ТА-покрытий

Материал детали	Толщина, мкм	Твердость, ГПа	Линейный износ, мкм	Напряжение пробоя, В	Электросопротивление, Ом	Скорость коррозии, мг/м <sup>2</sup> /год
АД000	81,94	481,59	27,03	1 438,05	9,28·10 <sup>12</sup>	199,26
АМц	70,68	417,48	34,06	1 221,97	8,53·10 <sup>12</sup>	232,41
АМг5	70,25	416,93	34,10	1 222,16	8,49·10 <sup>12</sup>	218,59
Д16	52,07	382,15	36,34	885,53	6,98·10 <sup>12</sup>	334,98
АК7	51,83	380,81	43,49	878,29	7,02·10 <sup>12</sup>	283,63

Таблица 2 – Показатели свойств МДО-покрытий

Материал детали	Толщина, мкм	Твердость, ГПа	Линейный износ, мкм	Напряжение пробоя, В	Электросопротивление, Ом	Скорость коррозии, мг/м <sup>2</sup> /год
АД000	194,54	18,32	13,37	2 780,12	7,68·10 <sup>14</sup>	298,78
АМц	166,47	17,26	16,78	2 328,05	6,22·10 <sup>14</sup>	387,43
АМг3	165,93	17,39	16,13	2 330,74	6,21·10 <sup>14</sup>	356,79
Д16	151,28	16,56	16,75	1 965,20	4,46·10 <sup>14</sup>	655,17
АК7	137,36	14,50	21,52	1 594,33	3,59·10 <sup>14</sup>	485,48

На рисунке 2 показана алюминиевая посуда, обработанная методом ТА, которая использовалась при проведении исследований. Полезно отметить, что ТА-покрытия характеризуются высокими декоративными свойствами – имеют однородную гляцевую поверхность, цвет (тон) которой можно варьировать в широких пределах, изменяя параметры обработки. МДО-покрытия не отличаются высокими декоративными свойствами, однако их пористая матовая поверхность хорошо подходит для окрашивания, характеризуется высокой адгезией с лакокрасочными материалами [16, 17].



Рисунок 2 – Алюминиевые сковороды, обработанные методом ТА

Также следует обратить внимание на то, что в процессе образования ТА- и МДО-покрытий происходит увеличение линейных размеров оксидируемых изделий, поскольку покрытия распространяются не только вглубь изделий относительно их начальных поверхностей, но и наружу. При использовании метода ТА увеличение может достигать 30...35 и 60...70 % толщины

ТА-покрытия на сторону и диаметр соответственно, а при использовании метода МДО – 35...40 и 70...80% [18]. Это позволяет использовать методы ТА и МДО для восстановления изношенных поверхностей элементов технологического оборудования [19, 20].

Благодаря рассмотренным особенностям, методы электрохимического оксидирования могут успешно применяться для улучшения эксплуатационных характеристик технологического оборудования пищевой промышленности. При этом, следует принимать во внимание, что себестоимость обработки энергоемким методом МДО на порядок выше, но она способна обеспечить получение более толстых покрытий с повышенными прочностными и электроизоляционными свойствами, большее увеличение размеров поверхностей. В свою очередь, обработка методом ТА способна обеспечить получение покрытий с повышенной коррозионной стойкостью и более высокими декоративными характеристиками.

Экспериментальное применение методов ТА и МДО в производственной практике позволило повысить поверхностную твердость, прочность и износостойкость элементов сепараторов, центрифуг и автоматических линий по упаковке продуктов питания, многократно увеличить их ресурс. Кроме того, с использованием метода ТА удалось придать высокие декоративные характеристики корпусным элементам пекарных и обжарочных печей, тестомесильных машин, фасовочных и разливающих автоматов, повысить их коррозионную стойкость и улучшить электроизоляцию с одновременным поверхностным упрочнением.

Рассмотренные разработки защищены десятью патентами РФ на изобретения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Концепция развития пищевой и перерабатывающей промышленности Российской Федерации на период до 2020 г. / К.В. Колончин, С.Н. Серегин, В.И. Нечаев и др. / под ред. В.И. Нечаева. – Краснодар: Просвещение-Юг, 2011. – 306 с.
2. Николаев, В.Н., Кретова, Ю.И. Инновационные подходы в решении приоритетных задач пищевой промышленности с использованием энергосберегающих технологий и оборудования // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Пищевые и биотехнологии». – 2014. – Т.2. – №4. – С.77–84.
3. Белецкий, В.М., Кривов, Г.А. Алюминиевые сплавы: состав, свойства, технология, применение: справочник / под ред. И.Н. Фридляндера. – Киев: КОМИНТЕХ, 2005. – 365 с.
4. Грищенко, Н.А., Сидельников, С.Б., Губанов, И. Ю. Механические свойства алюминиевых сплавов: монография. – М.: Инфра-М, 2018. – 194 с.
5. Сокол, В.А. Анодные оксиды алюминия: монография. – Минск: Бестпринт, 2011. – 430 с.
6. Малышев, В.Н. Модифицирование поверхностного слоя деталей методом микродугового оксидирования: состояние, возможности, перспективы //

Управление качеством в нефтегазовом комплексе. – 2014. – №1. – С.16–21.

7. Чуфистов, О.Е., Чуфистов, Е.А., Артемьев, В.П. Технология, строение и свойства покрытий, формируемых методами анодного оксидирования на алюминии и его сплавах // Цветные металлы. – №10. – 2009. – С.57–61.

8. Атрощенко Э.С., Чуфистов О.Е., Казанцев И.А., Симцов В.В. Структура и микротвердость покрытий, формируемых методами анодного оксидирования, на изделиях из алюминиевых сплавов // Материаловедение. – 2001. – №9. – С. 43–46.

9. Филяк, М.М., Каныгина, О.Н. Электрофизические свойства анодного оксида алюминия // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2013. – №9(158). – С.240–244.

10. Малышев В.Н., Марков Г.А., Федоров В.А. Особенности строения и свойства покрытий, наносимых методом микродугового оксидирования // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1984. – №1. – С. 26–27.

11. Аверьянов, Е.Е. Справочник по анодированию. – М.: Машиностроение, 1988. – 224 с.

12. Чуфистов, О.Е., Артемьев, В.П., Чуфистов, Е.А. Методика предварительной оценки пригодности алюминиевых сплавов к обработке микродуговым оксидированием // Технология металлов. – 2011. – №4. – С.28–32.

13. Хенли, В.Ф. Анодное оксидирование алюминия и его сплавов / пер. с англ. – М.: Metallurgia, 1986. – 153 с.

14. Патент RU 2354759. Способ получения покрытий / О.Е. Чуфистов, С.Б. Демин, Е.А. Чуфистов и др. – Бюлл. №13 от 10.05.2009.

15. Семенова, И.В., Флорианович, Г.М., Хорошилов, А.В. Коррозия и защита от коррозии. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 336 с.

16. Малышев, В.Н. Самоорганизующиеся процессы при формировании покрытий методом микродугового оксидирования // Перспективные материалы. – 1998. – №1. – С.16-21.

17. Рамазанова, Ж.М., Мустафа Л.М. Исследования получения покрытия на алюминиевых сплавах методом микродугового оксидирования // Universum: технические науки: электронный научный журнал. – 2015. – № 8-9(20). – С.4.

18. Чуфистов, О.Е. Изменение геометрических размеров изделий из алюминиевых сплавов в процессе обработки анодным оксидированием // Практика противокоррозионной защиты. – 2006. – №3(41). – С.49–53.

19. Коломейченко, А.В. Технология восстановления и упрочнения микродуговым оксидированием юбок поршней двигателей внутреннего сгорания из алюминиевых сплавов // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2007. – № 4. – С. 17–19.

20. Гакрамов, Р.Д. восстановление деталей микродуговым оксидированием // Молодежь и наука. – 2017. – № 4.2. – С.106.

*Статья поступила в редакцию 25.01.2018*

*Статья принята к публикации 15.03.2018*

УДК 331.45 + 613.62

## АНАЛИЗ ЗАБОЛЕВАЕМОСТИ РАБОТНИКОВ ПАССАЖИРСКОЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СЛУЖБЫ

© 2018

**Королева Анна Михайловна**, аспирант, старший преподаватель кафедры

«Управление безопасностью в техносфере»

*Российский университет транспорта*

(127994, Россия, Москва, улица Образцова, д. 9, стр. 9, e-mail: annakoroleva@list.ru)

**Пономарев Валентин Михайлович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой

«Управление безопасностью в техносфере»

*Российский университет транспорта*

(127994, Россия, Москва, улица Образцова, д. 9, стр. 9)

**Аксёнов Владимир Алексеевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой

«Техносферная безопасность»

*Российская открытая академия транспорта РУТ*

(125993, Россия, Москва, улица Часовая, д. 22/2)

**Юдаева Оксана Сергеевна**, доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник  
Всероссийский Научно-Исследовательский Институт Железнодорожной Гигиены Роспотребнадзора

(125438, Россия, Москва, Пакгаузное шоссе, д. 1, к.1, e-mail: vnijg@yandex.ru)

**Козлов Александр Сергеевич**, аспирант «Техносферная безопасность»

*Российская открытая академия транспорта РУТ*

(125993, Россия, Москва, улица Часовая, д. 22/2)

**Аннотация.** Основные неблагоприятные факторы, оказывающие негативное влияние на здоровье работников пассажирской железнодорожной службы, состоят из: вредных перевозимых химических веществ; вредных и опасных физических факторов; специфических биологических загрязнителей железнодорожного полотна, а также влияния психофизиологических показателей. Недостатки в диагностике профессиональных нарушений состояния здоровья работников железнодорожного транспорта приводят к тому, что профессиональные заболевания выявляются в поздних, запущенных и клинически выраженных, практически не курабельных стадиях заболеваний, которые уже невозможно скрыть ни работнику, ни работодателю, т.к. они нарушают трудоспособность работника. Данный факт должен быть учтен в процессе планирования и проведения комплекса лечебно-восстановительных и профилактических мероприятий, а также являться одной из предпосылок к необходимости в оптимизации режимов труда, отдыха и организации рабочих мест.

Цель статьи – анализ заболеваемости работников пассажирской железнодорожной службы, включая машинистов, проводников, начальников поезда, помощников машиниста. Задачи исследования – выявить зависимости заболеваемости анализируемой группы работников в соответствии с психофизиологическими показателями. Результат проведенных исследований свидетельствует о необходимости разработки перечней критериев и показателей, которые характеризуют безопасность труда проводников.

**Ключевые слова:** работники железной дороги, вредные факторы производства, вибрация, шум, гигиены труда, охрана труда.

## ANALYSIS OF MORBIDITY OF EMPLOYEES OF PASSENGER RAILWAY SERVICE

© 2018

**Koroleva Anna Mikhailovna**, Postgraduate student, Senior Lecturer of the Department

"Management of Safety in Technosphere"

*Russian University of Transport (MIIT) (127994, Russia, Moscow, Obratzova ul., 9, building 9,*

*e-mail: annakoroleva@liul.ru)*

**Ponomarev Valentin Mikhaylovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department

"Management of Safety in Technosphere"

*Russian University of Transport (MIIT) (127994, Russia, Moscow, Obratzova ul., 9, building 9)*

**Aksenov Vladimir Alekseevich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department

"Technosphere Safety"

*Russian Open Academy of Transport (MIIT) (125993, Russia, Moscow, Chasovaya ul., 22/2)*

**Yudaeva Oksana Sergeevna**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher

*All-Russian Research Institute of Railway Hygiene Rospotrebnadzor (125438, Russia, Moscow, Pakgauznoe shosse, 1, building 1, e-mail: vnijg@yandex.ru)*

**Kozlov Alexander Sergeevich**, Postgraduate student of the Department "Technosphere Safety"

*Russian Open Academy of Transport, RUTH (MIIT)*

*(125993, Russia, Moscow, Chasovaya ul., 22/2)*

**Abstract.** The main adverse factors that have a negative impact on the health of workers of passenger rail services consist of transported hazardous chemicals; hazardous physical factors; specific biological pollutants of the railway, as well as the influence of psychophysiological indicators. Shortcomings in the diagnosis of occupational human health

of railway workers lead to the fact that occupational diseases are detected in the late and not practically curable stages that are impossible to hide from neither the employee nor the employer, because they violate the disabled employee. This fact should be taken into account in planning and carrying out a complex of medical rehabilitation and preventive measures, as well as be a prerequisite for optimization of regimes of work, leisure and workplace.

This article aims at the analysis of morbidity of workers in passenger rail service, including train drivers, conductors, train supervisors, assistant drivers. Objectives of the study are to identify the dependence of the incidence of the analyzed group of employees in accordance with psycho-physiological indicators. The result of the research indicates the need for the development of lists of criteria and indicators that characterize the safety of the conductors.

**Keywords:** railway employees, harmful production factors, vibration, noise, occupational health, occupational safety.

Железнодорожный транспорт в РФ является приоритетным среди других видов транспорта, выполняющий около 75% от общего грузооборота и 35% пассажирских перевозок в стране. В связи с тем, что общая протяженность российских железных дорог составляет 7% от мировой сети, он выполняет около четверти объема грузооборота и около 15 % пассажирооборота железных дорог мира [1].

К специфическим приоритетным задачам на железнодорожном пассажирском транспорте относятся задачи, состоящие из обеспечения безопасности движения поездов, оптимизации перевозочного процесса, охраны и укрепления здоровья, работающих [2]. Основное звено в решении перечисленных задач – технологическая система, состоящая из трех основных факторов «человек – технические средства – среда», при этом именно человек является наиболее значимым элементом данной системы, так как именно его профессиональная пригодность формирует устойчивую деятельность железнодорожной отрасли.

Проводя анализ структуры причин, повлекших аварии на железнодорожном транспорте отметим, что они имеют прямопропорциональную зависимость от состояния здоровья работников рассматриваемой отрасли. Так, структура причин аварий на железнодорожном транспорте свидетельствует о высокой доли, более 60% причин, связанных именно с человеческим фактором. В связи с этим, медицинское обеспечение безопасности движения поездов является важным звеном в минимизации аварийности на железной дороге [3].

На сегодняшний день фиксируется возрастание уровня заболеваемости работников пассажирской железнодорожной службы, а именно увеличился уровень заболеваемости, инвалидности и, как результат, случаи отстранений от работы в связи с профессиональной непригодностью [4].

Основные неблагоприятные факторы, оказывающие негативное влияние на здоровье работников пассажирской железнодорожной службы, состоят из:

- вредных перевозимых химических веществ;
- вредных и опасных физических факторов (шума, вибрации, ультра и инфразвука, повышенных уровней ионизирующих излучений);
- специфических биологических загрязнителей железнодорожного полотна [5].

Следствием регулярного транспортного шума является развитие у работников данной отрасли беспокойства и раздражительности (85%), бессонницы (67%), нарушение сна и вероятности возникновения невроза

(32%). Следует отметить, что уровень шума, соответствующий 35-40 дБ приводит к снижению скорости восприятия информации и умственной работоспособности, а в случаях, если воздействия шума более высокого уровня данное неблагоприятное влияние на состояние здоровья работника возрастает многократно.

Одна из наиболее многочисленных групп железнодорожной профессии – машинисты и помощники машинистов, основная деятельность которых заключается в обеспечении безопасности железнодорожного состава. Многочисленные проведенные санитарно-гигиенические характеристики условий труда этой профессии железнодорожников зафиксировали у отдельных тепловозов уровень шума в кабинах, достигающий показателя 118-120 дБ.

Еще вредными факторами, оказывающий негативное влияние на работу и здоровье машинистов и помощники машинистов являются вибрация, значение которой в процессе работы может превышать норму в 2-2,5 раза, работа в ночное время суток и возрастающее нервно-эмоциональное напряжение [6]. Также необходимо отметить, что в летний период в случае отсутствия достаточной вентиляции кабин машинистов температура может достигать 40-47<sup>0</sup>С в комплексе со снижением относительной влажности и низкой подвижности воздуха. В зимний период при наружной температуре минус 20<sup>0</sup>С температура в кабине машиниста составляет не более 4,5<sup>0</sup>С и характеризуется значительными перепадами, достигающими 11<sup>0</sup>С. При этом на уровне пола температура фиксирует отрицательные значения.

Ведущие показатели труда машинистов и помощников машинистов состоят из однообразия и монотонности, малого объема рабочего помещения (кабины машиниста) и определенного дискомфорта интерьера, нерегламентированности и неопределенности физической и психической нагрузки, тесноты и малоподвижности, физически и психически насыщенной деятельности [7].

В соответствии с выявленными вредными факторами производства, рассмотрим перечень основных заболеваний, характерных для машинистов и помощников машинистов. На первой месте профессиональных болезней у машинистов и помощников машинистов находятся пылевые болезни легких (пневмокониозы и пылевой бронхит), вибрационная болезнь и профессиональная тугоухость [9].

На втором месте болезни опорно-двигательного аппарата и периферической нервной системы, профессио-

нальные интоксикации и профессиональные аллергии (включая профессиональные аллергодерматозы).

Так, в соответствии со статистикой заболеваемости работников железной дороги на рисунке 1 представим динамику изменения заболеваемости машинистов и помощников машинистов в период 2007–2016 гг.

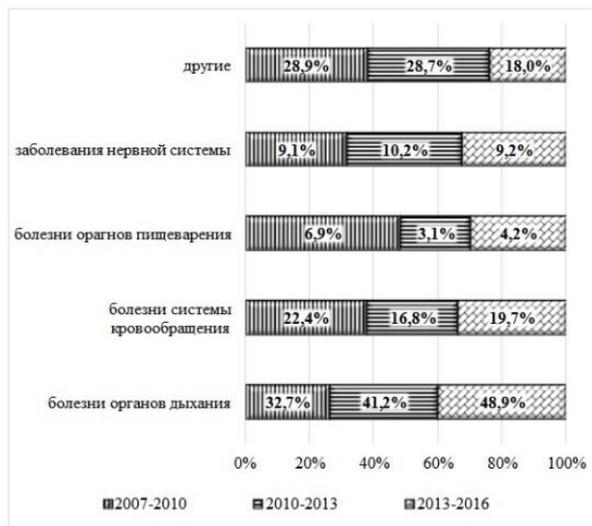


Рисунок 1 – Динамика изменения заболеваемости машинистов и помощников машинистов в период 2007–2016 гг.

Так, в соответствии с динамикой, представленной на рисунке 1 нельзя выявить какую-либо закономерность того или иного заболевания, но явным видится тот факт, что в сравнении с периодом 2007–2010 гг. существенно возросло число болезней органов дыхания в периоде 2013–2016 гг. [8].

Проводя анализ структуры болезней органов дыхания отметим, что во всем анализируемом периоде большая часть (более 90%) приходилась на острые респираторные инфекции и грипп.

Проводя анализ структуры болезней системы кровообращения отметим, что во всем анализируемом периоде большая часть (около 53%) приходится на гипертоническую болезнь.

Проводя анализ структуры болезней органов пищеварения отметим, что они в равных долях состоят из хронических заболеваний желудка (таких как язвенная болезнь желудка и 12-перстной кишки, гастродуоденит), заболеваний желчного пузыря и заболеваний желчевыводящих путей. Основные причины заболеваний заключаются в характере, режимах и качестве питания работников, а также гиподинамии.

Проводя анализ структуры заболеваний нервной системы, отметим, что во всем анализируемом периоде большая часть (более 80%) приходится на радикулит, возникающую в связи с остеохондрозом различных отделов позвоночника, возникающем из-за вынужденной нерациональной рабочей позы, статических нагрузок и гиподинамии.

В группу другие заболевания включены заболевания, включают болезни органов зрения, заболевания

крови и кроветворных органов, болезни эндокринной системы, болезни кожи, болезни уха и сосцевидного отростка.

Все перечисленные вредные факторы оказывают существенное негативное влияние на здоровье и, как следствие уровень заболеваемости машинистов и помощники машинистов. При этом также следует отметить, что на работников также влияют и различные психофизиологические показатели. Так, из-за повышенной напряженности внимания при недостаточном освещении существенно снижается работоспособность данной группы работников, появляется напряжение в глазах, повышается усталость, а в комплексе с запыленностью помещений приводит к заболеваниям органов зрения.

Помимо этого, на машинистов и помощников машинистов оказывают негативное влияние такие психофизиологические показатели, как гиподинамия, приводящая к нарушениям функций организма (таких как опорно-двигательный аппарат, система кровообращения, дыхание, пищеварение), работа в ночное время, приводящая к рассогласованию внешних и внутренних ритмов организма, которые могут явиться следствием нервных расстройств, так и иных психофизиологических показателей.

Далее рассмотрим заболеваемость еще одной группы работников пассажирской железнодорожной службы – проводников.

К основным вредным и неблагоприятным производственным факторам, характерным для данных работников относятся: вибрация, шум, запыленность, воздействие химических веществ, воздействие неблагоприятной микробиологической атмосферы и др.

В соответствии с проведенными исследованиями ВНИИЖГ<sup>1</sup> отмечено, что данные факторы имеют тесную взаимосвязь не только с возрастными особенностями, но и с характерными факторами производственно-профессиональной деятельности рассматриваемой группы работников пассажирской железнодорожной службы.

На рисунке 2 представим структуру заболеваемости проводников.

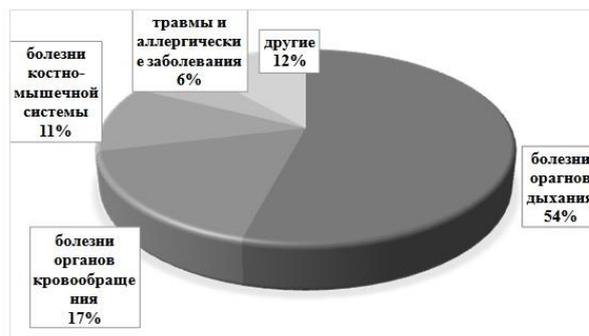


Рисунок 2 – Структура заболеваемости проводников

<sup>1</sup> Всероссийский Научно-Исследовательский Институт Железнодорожной Гигиены

Так, в соответствии с представленной структурой отметим, что для рассматриваемой группы работников характерны ряд особенностей, а именно, для проводников характерны такие заболевания, состоящие из болезней органов дыхания, органов кровообращения, костно-мышечной системы, травмы и аллергические заболевания.

Анализируя структуру болезней органов дыхания, отметим, что большая их часть представлена ОРЗ, ринитами, бронхитами и пневмонией, что характеризует необходимость нормализации и эффективного регулирования воздушной среды пассажирского вагона. Также следует отметить, что около 13% болезней органов дыхания приводит к утрате профессиональной пригодности проводников, причиной которой является бронхиальная астма и другие рецидивирующие хронические заболевания бронхально-легочной системы из-за высокого показателя бактериальной загрязненности воздушной среды пассажирских вагонов, а также из-за присутствия в воздухе различных химических соединений и неблагоприятного климата.

Отдельно следует отметить, что проводниками работают преимущественно женщины, в связи с этим при анализе структуры заболеваемости проводников учитывались только женщины.

В соответствии с выявленными заболеваниями проводников отметим необходимость реализации санитарно-химических исследований воздушной среды пассажирских вагонов, цель которых направлена на решения ряда задач, состоящих из:

- уточнении источников деструкции;
- идентификации химически-активных веществ, находящихся в воздухе в вагоне;
- выявлении токсикологической характеристики выявленных химических примесей, включая отношение их к регламентированным классам опасности;
- реализации оценки рисков, влияющих на здоровье проводников в зависимости от выявленных неблагоприятных факторов.

Так, проводимые исследования ВНИИЖГ показали, что:

- в пассажирских вагонах фиксируется повышенное содержание полимерсодержащих веществ;
- из-за используемых в конструкции вагонов полимерсодержащих веществ происходит выделением вредных веществ, которое на сегодняшний день не регламентируется органами железнодорожной гигиены;
- проведенные санитарно-химические испытания, проведенные сотрудниками ВНИИЖГ свидетельствуют о повышении уровня химических веществ, негативно сказывающихся на здоровье проводников существенно превышает норму, а именно показатель стирола превышает норму в 200 раз, а показатель формальдегида превышает норму в 30 раз.

Результат проведенных исследований свидетельствует о необходимости разработки перечней критериев и показателей, которые характеризуют безопасность труда проводников [10].

Проводя анализ вредных факторов производства, негативно сказывающихся на здоровье начальника поезда, отметим, что они идентичны факторам, оказывающим негативное влияние на здоровье машиниста поезда. При этом следует отметить, что структура данных заболеваний отличается от машинистов поезда. Так, на рисунке 3 представим структуру заболеваемости начальника поезда.

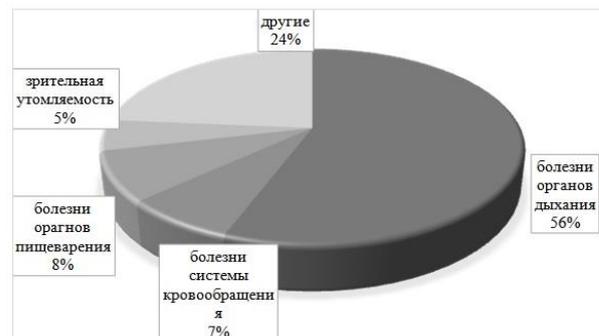


Рисунок 3 – Структура заболеваемости начальника поезда

Проводя анализ структуры болезней органов дыхания отметим, что у начальников поезда они представлены ОРЗ, ринитами, бронхитами, пневмонией, бронхиальной астмой, заболеваниями бронхально-легочной системы, аллергическими реакциями.

Проводя анализ структуры болезней системы кровообращения отметим, что у начальников поезда они представлены преимущественно гипертонической болезнью, возникающей из-за шума, вибрации, эргономики.

Проводя анализ болезней органов пищеварения отметим, что у начальников поезда они связаны с неблагоприятными санитарно-бытовыми условиями труда.

К причинам зрительной утомляемости рассматриваемой группы работников относятся бактериальная загрязненность воздушной среды и поверхностей, недостаточная освещенность помещения, а также тяжесть и напряженность трудового процесса.

Следует отметить, как на проводника, так и на начальника поезда существенно влияние оказывают идентичные психофизиологические показатели. А именно, в связи с тем, что большая часть рабочего времени осуществляется в пассажирских вагонах, то цветовое оформление внутривагонного пространства должно быть таким, чтобы не способствовало утомляемости организма работников.

Помимо этого, в связи с тем, что данные сотрудники также работают в ночное время, существенными психофизиологическими показателями являются: повышенная напряженность внимания при недостаточном освещении, способная привести к головной боли, заболеваниям органов зрения и нервным расстройствам; эмоциональное напряжение, связанное с напряженным графиком работы, высокой ответственностью за здоровье и безопасность пассажиров, взаимодействием с пассажирами, которое может явиться следствием наруше-

нием центральной нервной системы; работа в ночное время, в комплексе с отсутствием грамотно построенного режима отдыха данных сотрудников может явиться следствием заболеваемости как сердечно-сосудистой, так и нервной системы, которые обуславливаются рассогласованием внешних и внутренних ритмов организма, которые могут явиться следствием нервных расстройств.

Резюмируя заболеваемости работников пассажирской железнодорожной службы отметим, что недостатки в диагностике профессиональных нарушений состояния здоровья работников железнодорожного транспорта приводят к тому, что профессиональные заболевания выявляются в поздних, запущенных и клинически выраженных, практически не курабельных стадиях заболеваний, которые уже невозможно скрыть ни работнику, ни работодателю, т.к. они нарушают трудоспособность работника.

В сложившейся ситуации работодатель теряет огромное количество высокооплачиваемых квалифицированных кадров и вынужден готовить новых представителей этих профессий, неся при этом большие экономические потери. В свою очередь, признание профессиональной непригодности обуславливает потерю любимой профессии, а размеры материальной компенсации за утрату здоровья от профессионального заболевания далеко не всегда удовлетворяют запросам работника. Возникают спорные, конфликтные ситуации, значительно ухудшающие качество жизни пациента и врача.

Такое положение дел принципиально нарушает позиции профилактической медицины, в частности гигиены труда, утверждающей принципы как можно более ранней диагностики самых начальных признаков нарушений здоровья от воздействия производственных факторов [9].

Анализ заболеваемости машинистов и помощников машинистов в период 2007–2016 гг. фиксирует увеличение числа заболеваний органов дыхания. Причина возникновения данных заболеваний связана с неблагоприятным микроклиматом, высокой бактериальной и химической загрязненностью воздушной среды. Данный факт должен быть учтен в процессе планирования и проведения комплекса лечебно-восстановительных и профилактических мероприятий, а также являться одной из предпосылок к необходимости в оптимизации режимов труда, отдыха и организации рабочих мест.

Анализ заболеваемости проводников свидетельствует о том, что большая часть заболеваний относится к заболеваниям органов дыхания, что характеризует необходимость нормализации и эффективного регулирования воздушной среды пассажирского вагона.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Евсеева И. В. Медико-социальная оценка здоровья железнодорожников различных профессиональных групп: автореф. дис. ... канд. мед. наук / Евсеева И. В. – М., 2002. – 22 с.

2. Капцов В. А. Новые организационно-методические подходы к профилактическим медицинским осмотрам на железнодорожном транспорте / В. А. Капцов, А. Ю. Троицкая, В. Б. Панкова // Гигиена и санитария. – 2012. – № 2. – С. 66–70.

3. Атьков О.Ю., Цфасман А.З.. Энциклопедия. – Медицина. – 2014 – 614 с.

4. Лисобей В.А. Заболеваемость работников транспорта. Одесса: Черноморье, 2015. – С. 262.

5. Артамонова В.Г., Мухин Н.А. Профессиональные болезни. Учебное пособие. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Медицина, 2014. – 480 с.

6. Дмитриева Т.Б. Неврозы: соматоформная дисфункция вегетативной нервной системы у лиц, работающих с психофизическим напряжением. Клинико-организационные аспекты лечения, реабилитации, профилактики. – М.: Миклош, 2009. – 536 с.

7. Вильк М.Ф.. Железнодорожная медицина: современное состояние и перспективы развития / Вильк М. Ф., Краевой С. А. – Москва: Сам полиграфист, 2012. – 232 с.

8. Камаев Игорь Александрович, Леонова Елена Сергеевна, Щёкотов Евгений Валерьевич Особенности заболеваемости машинистов локомотивов Горьковской железной дороги // Медицинский альманах. 2016. №3.

9. Панкова В.Б. Современные проблемы профессиональной патологии на железнодорожном транспорте России. Сайт ВНИИЖГ. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.vniijg.ru/press-centr/sbornik-statej-k-90-letiyu-vniizhg/#\\_Toc442355232](http://www.vniijg.ru/press-centr/sbornik-statej-k-90-letiyu-vniizhg/#_Toc442355232) (дата обращения 17.01.2018 г.)

10. Сайт ВНИИЖГ. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.vniijg.ru/> (дата обращения 17.01.2018 г.)

11. Овечкина Ж.В., Юдаева О.С. Санитарно-гигиеническая безопасность пассажирских вагонов в условиях эксплуатации // История формирования и развития санитарно-эпидемиологической службы на железнодорожном транспорте России: материалы науч.-практич. конф. – М.: Изд-во ООО «СПМ-Индустрия», 2015. – С. 52–57.

12. Юдаева О.С., Королева А.М., Козлов А.С. Влияние освещенности в помещениях пассажирских вагонов на условия труда работников пассажирского комплекса // Проблемы безопасности российского общества. 2017. № 3. С. 99–100.

13. Юдаева О.С. Анализ условий труда и заболеваемости проводников пассажирских вагонов // Известия Транссиба. 2014. №2 (18).

14. Лосавио, Н.Г., Юдаева О.С. Санитарно-химические испытания полимерсодержащих материалов, рекомендованных для использования в пассажирских вагонах // Наука и техника транспорта. – 2010. – № 3. – С.12–18.

15. Юдаева О.С., Гладаренко А.С. Санитарно-химическое состояние воздушной среды современных пассажирских вагонов // Медицина труда: Реализация глобального плана действий по здоровью работающих на 2008–2017 гг.: материалы Всерос. конф. с междунар.

участием, посвященной 85-летию ГУ НИИ Медицины труда РАМН. – М.: МГИУ, 2008. – С. 402–404.

16. Юдаева О.С., Егорова О.Г., Гладаренко А.С. Аналитический обзор негативного влияния шума и вибрации в пассажирских вагонах на комфортность проезда пассажиров и условия труда обслуживающего персонала // Наука и техника транспорта. – 2014. – № 2. – С.85–88.

17. Юдаева О.С., Королева А.М. Влияние цвета в пассажирских вагонах на психофизиологическое состояние пассажиров и проездных бригад // IX Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов Роспотребнадзора «Современные проблемы эпидемиологии, микробиологии и гигиены». 2017 Иркутск. С. 164–165.

18. Панченко Л.Л., Спиридонова Н.Э. Профессиональный стресс и отношение к здоровью у проводников пассажирских вагонов / Л.Л. Панченко, Н.Э. Спиридонова // Вестник морского государственного университета – 2008. – № 29. – С. 93–106.

19. Хитрова М.А. Влияние цвета на здоровье и психику человека / М.А. Хитрова // Бюллетень медицинских интернет-конференций. – 2013. – №11 (т. 3). – С. 1284.

20. Санитарно-эпидемиологические правила 2.5.1198-03 «Санитарные правила по организации пассажирских перевозок на железнодорожном транспорте».

*Статья поступила в редакцию 26.01.2018*

*Статья принята к публикации 14.03.2018*

УДК 629.735.017

## ЗАБОЛЕВАЕМОСТИ С ВРЕМЕННОЙ УТРАТОЙ ТРУДОСПОСОБНОСТИ КАК ИНСТРУМЕНТ ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ РАБОЧИХ МЕСТ

**Андрусов Вадим Эдуардович**, главный специалист

*Научно-исследовательский институт организации здравоохранения и медицинского менеджмента Департамента здравоохранения города Москвы*

*(115184, Россия, г. Москва, ул. Большая Татарская, д. 30, e-mail: niiozmm@zdrav.mos.ru)*

**Николайкин Николай Иванович**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры безопасности полётов и жизнедеятельности

*Московский государственный технический университет гражданской авиации*

*(125493, Россия, г. Москва, Кронштадтский бульвар, д. 20, e-mail: info@mstuca.aero)*

**Худяков Юрий Григорьевич**, кандидат технических наук, преподаватель

*Учебно-тренировочный центр № 21 АО «Аэропорт Внуково»*

*(119027, Россия, Москва, Б. Внуковская, 2. "Международный аэропорт "Внуково". Учебно-тренировочный центр, 21, e-mail: bimotek-h@mail.ru)*

**Аннотация.** По требованию отечественного трудового законодательства обязанности заболевшего работника перераспределяются среди оставшихся работников одинаковой или вышестоящей категории. Перераспределение обязанностей заболевшего работника повышает нагрузку на оставшихся в виде сверхурочных работ, расширения зон обслуживания, увеличения объема работы, что, в конечном итоге, может привести к неспособности оставшегося персонала в полном объеме достаточно качественно выполнять дополнительные должностные обязанности.

В статье предлагается для оценки вероятности событий, с учетом некоторых аспектов, использовать данные медицинских осмотров и заболеваемости работников. Акцентируется внимание на том, что существующие законодательные ограничения не позволяют работодателям в полной мере использовать возможности анализа заболеваемости работников. Доступный работодателю после проведения обязательных медицинских осмотров итоговый акт, содержит только обобщенную информацию: численность категорий работников, прошедших осмотр; перечень впервые установленных хронических заболеваний; перечень впервые установленных профессиональных заболеваний. Эта информация не сопоставлена с должностями или структурными подразделениями работников, прошедших осмотр.

Поставлена задача поиска механизмов измерения «внешних эффектов перенапряжения оставшихся работников». Предложено введение понятие «Перенапряжение», выражающееся в неспособности работников качественно и в полном объеме выполнять как свои обязанности, так и заболевшего работника, и понятие «Общая заболеваемость». Для количественной оценки новых понятий предлагается использовать целочисленную пятибальную шкалу, по которой методом экспертной оценки присваивать значения от одного до пяти.

Ранее предложенную схему древовидной структуры для интеграции показателей опасности факторов производственной среды производственных процессов технического обслуживания авиатехники предлагается дополнить новыми показателями. Делается вывод, что предложенное позволит не только обеспечить требуемые уровни безопасности, но за счёт качества выполненных работ, обеспечить предупреждение аварий на опасных объектах, и, в частности, защитить окружающую среду от аварийно-залпового загрязнения.

**Ключевые слова:** безопасность, работник, техническое обслуживание, человеческий фактор, состояние здоровья, больничный лист, трудоспособность, организация производства.

## INCIDENCES WITH TEMPORARY DISABILITY AS THE TOOL OF WORKPLACES SAFETY ASSESSMENT

**Andrusov Vadim Eduardovich**, Senior Specialist of State Budgetary Institution

*“Moscow Scientific Research Institute of Healthcare Organization and Medical Management”*

*Moscow Health Department*

*(115184, Russia, Moscow, Bolshaya Tatarskaya ul., 30, e-mail: vadim\_andrusov@mail.ru)*

**Nikolaykin Nikolay Ivanovich**, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Professor of Life and Flights Safety (LFS) Chair

*Moscow State Technical University of Civil Aviation*

*(125493, Russia, Moscow, Kronshtadskii boulevard, 20, e-mail: n.nikolaykin@mstuca.aero)*

**Khudyakov Yuri Grigoryevich**, Candidate of Technical Sciences, Teacher

*Vnukovo Airport Air Training Center No. 21 of JSC*

*(119027, Russia, Moscow, B. Vnukovskaya ul., 2, e-mail: bimotek-h@mail.ru)*

**Annotation.** At the request of the domestic labor legislation, the duties of the sick employee are redistributed among the remaining employees of the same or higher category. The redistribution of duties of a sick worker increases the burden on those who remain in the form of overtime, expansion of service areas, increase in the amount of work, which, in the final analysis, can lead to the inability of the remaining staff in full to perform qualitatively additional job duties.

In the article it is proposed to use the data of medical examinations and morbidity of workers to assess the probability of events, taking into account some aspects. Attention is focused on the fact that existing legislative restrictions do not allow employers to fully use the opportunities for analyzing the incidence of workers. Available to the employer

after carrying out mandatory medical examinations the final act, contains only generalized information: the number of categories of workers who have been examined; list of newly diagnosed chronic diseases; a list of newly established occupational diseases. This information is not compared with the posts or structural subdivisions of employees who have been examined.

The task is to find mechanisms for measuring "external effects of overstrain of the remaining workers". The introduction of the concept of "overexertion", expressed in the inability of workers to perform qualitatively and in full scope both their duties and the sick worker, and the concept of "General morbidity" is proposed. To quantify the new concepts, it is proposed to use an integral five-point scale, according to which one can assign values from one to five by the expert evaluation method.

The proposed scheme of the tree structure for integration of hazard indicators of industrial environment factors in the production processes of aircraft maintenance is proposed to be supplemented with new indicators. It is concluded that the proposed will not only provide the required levels of safety, but due to the quality of the work performed, to ensure the prevention of accidents at hazardous facilities, and in particular to protect the environment from emergency salvo pollution.

**Keywords:** safety, worker, maintenance, human factor, health status, sick leave, work capacity, production organization.

Применительно к организации авиатранспортной услуги многокомпонентная система «человек-машина» исследовалась многократно и преимущественно с позиций структурного анализа областей, составляющих авиатранспортную услугу и позиций Международной организации гражданской авиации (ИКАО) для обеспечения комплексной безопасности в отрасли [1] на приемлемом уровне. Безопасность при организации производства поддерживается на соответствующем уровне посредством непрерывного процесса выявления угроз [2] и управления риском [3], включая предотвращение глобальных экологических проблем [4] и снижение, вплоть до исключения, экологических рисков от негативных авиационных событий [4].

Исследовались варианты структуры и количественной оценки факторов, влияющих на безопасность по источникам их возникновения и по структуре авиатранспортной услуги в гражданской авиации (ГА) [6], выделяя отдельно подготовку и поддержание в заданном техническом состоянии воздушных судов [3]. При наземной подготовке воздушных судов показана необходимость оценки профессиональных рисков как некоторой функции рисков профессиональных заболеваний и рисков травматизма [7]. Отдельно выделялась научная проблема необходимости разработки динамической модели формирования риска производственной среды в процессе работ по техническому обслуживанию (ТО) авиационной техники (АТ) [8].

Исследовались современные аспекты законодательства Российской Федерации, могущие влиять на безопасность наземной подготовки воздушных судов через три частные области опасности категорий персонала уровней «Административный персонал», «Специалисты, технические исполнители», «Производственный персонал» [9]. При исследовании факторов, так называемой «грязной дюжины», непосредственно влияющих на возникновение ошибок, сделан вывод о том, что некоторые из них не могут не быть связаны со здоровьем человека [10]. Воздействие факторов производственной среды на саму производственную деятельность, как представлено в монографии «Управление опасностями производственной среды» [11], определяется факторами общей области опасностей, содержащихся в основных ее компонентах (организационных, социальных или «человеческий фактор», технических), осуществляющих воздей-

ствие на общую область опасностей, что позволило сформировать вывод о ранге их значимости. Поэтому в работе для повышения уровня безопасности путём снижения числа ошибок работников рассматривается целесообразность и возможные пути совершенствования взаимодействия работников, обслуживающих авиатехнику, путём подбора состава бригад. В работе [12] внимание акцентировалось на влиянии на окружающую среду авиационных происшествий.

В работе [11] предложены новые понятия, выделены основные показатели опасностей, а по факторам «Профзаболеваемость», «Травматизм», «Компетентность» обоснованы критерии (показатели), по которым им присваиваются целочисленные значения от 1 до 5. Для объединения исходных показателей опасности факторов производственной среды, определяемых прежде всего из материалов специальной оценки условий труда (СУОТ) для производственных процессов (на примере ТО АТ в ГА) впервые была предложена схема древовидной структуры, приведенная на рисунке 1.

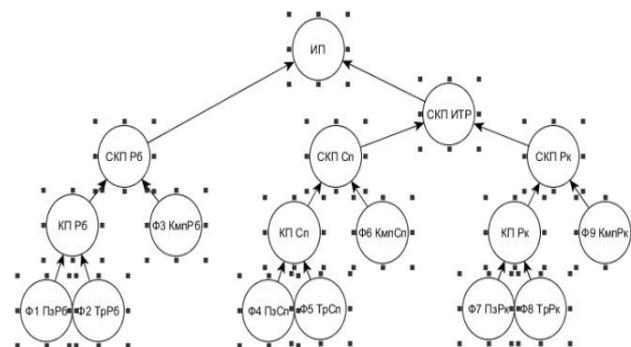


Рисунок 1 – Схема интеграции («свертки») 9-ти исходных показателей опасности факторов производственной среды процессов ТО АТ, по Схема древовидной структуры для интеграции («свертки») 9-ти исходных показателей опасности факторов производственной среды производственных процессов ТО АТ, по [11].

В работе [11] также рассмотрены две математические модели изменения опасности факторов производственной среды (статическая и динамическая), позволяющие получить интегральный показатель

опасности факторов производственной среды и выявить динамические режимы (циклы различных периодов) для различных значений входящих в интеграционные матрицы параметров.

Предложенные ранее показатели опасности факторов производственной среды, формирующие интеграционные матрицы, не включают опасности областей коммуникационной сферы, человеческого фактора связанные с возложением дополнительной производственной нагрузки на различные категории персонала в связи с заболеваниями отдельных работников. Административное перераспределение функций (организационная область) привнесит опасности в область «человеческого фактора», реализующего действия работника, заменяемого по состоянию здоровья.

За заболевшего работника его обязанности распределяются среди оставшихся работников той же или более высокой категории. Выполнение требований раздела IV (Рабочее время) Трудового кодекса РФ (при замещении заболевшего) приводит к повышению нагрузки на иных сотрудников увеличением объема работы, расширением зон обслуживания, сверхурочными работами и т. п., что, в пределе, может привести к невозможности выполнять расширившиеся обязанности в полном объеме с необходимым качеством.

Неспособность оставшегося персонала в полном объеме выполнять возросшие должностные обязанности может проявляться в различном виде (включая, но не ограничиваясь): увеличение количества несоответствий, обнаруженных при внутренних аудитах системы качества, небезопасные действия работников, микротравмирование работников, факты оказания работникам медицинской помощи без потери их трудоспособности, несчастные случаи разной степени тяжести.

Поэтому неблагоприятное состояние здоровья работника [9], заболеваемость работников следует рассматривать как факторы производственной среды, обладающие характеристиками вероятности и тяжести возможного ущерба (серьезность события). Следовательно, необходима методика интеграции факторов здоровья в общую систему интегральной оценки уровня опасности производственной среды.

При ухудшении здоровья работника до состояния, когда он неспособен выполнять свои обязанности возникают определенные трудности у других работников. Неспособность выполнять свои должностные обязанности в полном объеме в связи с ухудшившимся состоянием здоровья может быть рассмотрена вне традиционных процедур, связанных с обязательными медицинскими осмотрами (ОМО) с учетом изложенного далее.

Аспекты обязательных медицинских осмотров работников следующие.

Обязательные медицинские осмотры (предварительные и периодические) являются видом допуска работника к трудовой деятельности по критерию «отсутствие у работника медицинских противопоказаний

(заболеваний или состояний) к работе». ОМО, как процедура, применяется не для всех работников. Результат применения процедуры к работнику и юридически доступный работодателю, может принять одно из двух значений – допущен/не допущен (медицинские противопоказания не выявлены/ медицинские противопоказания выявлены).

Медицинская организация, проведшая обязательные медицинские осмотры, в соответствии с утвержденными процедурами имеет в своем распоряжении всю необходимую информацию для анализа заболеваний (состояний) по классам и группам в соответствии с Международной статистической классификации болезней и проблем, связанных со здоровьем десятого пересмотра (МКБ-10) по каждому работнику, прошедшему обязательный медицинский осмотр, исходя из последовательности процедур, форм, приказов Минздрава России. Источниками информации являются: карта пациента, которая должна заполняться на каждого работника, проходящего обязательный медицинский осмотр [13] (далее медицинская карта пациента); талон на прием, которым должен предваряться каждый случай обращения в медицинскую организацию, в том числе по поводу обязательного медицинского осмотра [13] (далее талон на прием); ввод информации по обращению пациента в медицинскую информационную систему. Однако ввод информации в медицинскую информационную систему формально обязателен только в случае оказания медицинской помощи, оказанной застрахованным по обязательному медицинскому страхованию (ОМС) лицам. Важно, что обязательные медицинские осмотры работников по ОМС не проводятся.

В результате, информация о зарегистрированных заболеваниях (состояниях) составляет так называемые первичные статистические данные [14], направляемые медицинскими организациями в органы государственной власти субъектов Российской Федерации. В официальной статистической информации эти первичные статистические данные трансформируются в информацию Федерального плана статистических работ [15] и форму федерального статистического наблюдения № 12 «Сведения о числе заболеваний, ... в районе обслуживания медицинской организации» [16].

Заключительный акт, доступный работодателю после проведения ОМО, содержит обобщенную информацию по численности различных категорий работников, прошедших осмотр, перечень впервые установленных хронических заболеваний, перечень впервые установленных профессиональных заболеваний. Указанная в заключительном акте информация никак не сопоставлена с должностями или структурными подразделениями работников, прошедших ОМО.

Аспекты заболеваемости работников следующие.

Работник, здоровье которого ухудшилось до состояния, при котором он неспособен выполнять свои трудовые обязанности, вправе обратиться за пособием по временной нетрудоспособности (по больничному

листу) к своему работодателю, соответствующим образом оформив временную нетрудоспособность [17].

Медицинская организация, проводящая обязательную процедуру экспертизы временной нетрудоспособности работника и выдавая ему листок временной нетрудоспособности (больничный лист), имеет в своем распоряжении всю необходимую информацию для анализа заболеваний (состояний) по классам и группам в соответствии с МКБ-10 по каждому работнику исходя из обязательности оформления в данном случае медицинской карты пациента и талона на прием.

В официальной статистической информации первичные статистические данные о временной нетрудоспособности трансформируются в информацию Федерального плана статистических работ (пункт 15.12. Информация о причинах временной нетрудоспособности) [15] и форму федерального статистического наблюдения № 16-ВН «Сведения о причинах временной нетрудоспособности» [18].

Аспекты доступного работодателю анализа заболеваемости работников следующие.

В силу ограничений, накладываемых статьей 13 (Соблюдение врачебной тайны) Федерального закона от 21.11.2011 № 323-ФЗ «Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации» [19], работодателю недоступен весьма информативный вариант анализа заболеваемости по ее структуре с выделением заболеваний, вызывающих наибольшую потерю рабочего времени из-за временной нетрудоспособности работников.

Анализ заболеваемости работников без раскрытия сведений, составляющих врачебную тайну, возможен в рамках процедур организации и проведения наблюдения за состоянием здоровья работников [20] и анализа стоимости болезни [21], и сам по себе обладает выраженной наглядностью [22] по таким показателям, как: число случаев временной утраты трудоспособности на 100 работающих в год; число дней временной утраты трудоспособности на 100 работающих в год; средняя продолжительность одного случая нетрудоспособности.

С учетом указанных аспектов заболеваемость работников с временной утратой трудоспособности может рассматриваться как составная часть понятия «показатель опасности факторов здоровья» (наличия у работника заболевания, препятствующего работе) и, таким образом, может быть оценена методом экспертной оценки используя пяти бальную цельно численную шкалу, как рекомендуется в соответствии с рисунком 2-12 «Таблица степени серьезности факторов риска для безопасности полетов» РУБП ИКАО [23], путём дополнительного учета степени тяжести возможного ущерба (серьезности события).

Предлагается внести градации серьезности «показатель опасности факторов здоровья» (наличие у работника заболевания, препятствующего работе), как приведено в таблице 1.

Таблица 1 – Предлагаемая оценка опасности фактора «Общая заболеваемость», как показателя опасности факторов здоровья.

Наименование категории	Характеристика тяжести возможного ущерба (серьезности события)	Присваиваемое значение показателя
Ничтожная	Работники не испытывают неудобств и ограничений, малозначительные последствия	1
Незначительная	Работники испытывают неудобство и некоторые ограничения при эксплуатации инструментов, оборудования	2
Значительная	Работники не способны в полной мере справиться с выполняемой работой вследствие условий, понижающих эффективность их работы	3
Опасная	Нет уверенности в правильном и полном выполнении работником своих задач	4
Катастрофическая	Отстранение от работы по состоянию здоровья	5

Неспособность оставшегося персонала в полном объеме выполнять возросшие должностные обязанности ведет к следующим последствиям: растёт привлечение работников к сверхурочным работам, увеличивается количество несоответствий, обнаруживаемых при текущей работе и в процессе внутренних аудитов, небезопасным действиям работников, микротравмированию работников, оказанию работникам медицинской помощи без потери трудоспособности, несчастным случаям разной степени тяжести. В ГА правилами ИКАО предусматривается, что система отчетности (как составная часть системы оценки, анализа ошибок, последствия ошибок, профилактических мер для недопущения ошибок в будущем) отдельно рассматривается в главе 4 «Отчетность, анализ и принятие решений» руководства «Основные принципы учета человеческого фактора в руководстве по техническому обслуживанию воздушных судов» [24].

В распоряжении иных российских организаций, не являющихся авиапредприятиями, из числа общепринятых стандартных процедур имеется следующее. В системе управления качеством это принцип 2.3.6. (Принятие решений, основанное на свидетельствах) ГОСТ Р ИСО 9000-2015 «Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь» [25], а также пункт 4.7. (Формы) ГОСТ Р ИСО/ТО 10013-2007 «Руководство по документированию системы менеджмента качества» [26]. В системе управления охраной труда в соответствии могут вестись записи данных о связанных с работой травмах, ухудшениях здоровья, болезнях и инцидентах, что основывается на п. 4.5.5. ГОСТ 12.0.230-2007 «ССБТ. Системы управления охраной труда. Общие требования» [27], п. 5.2.3.5. ГОСТ 12.0.230.1-2015 «ССБТ. Системы управления охраной труда. Руководство по применению ГОСТ 12.0.230-2007» [28], и п. 54 Типового положения о системе управления охраной труда [20].

На основании выше изложенного, предлагается введение понятие «Показатель опасности перенапряжения

оставшихся работников», выражающееся в неспособности персонала качественно и в полном объеме выполнять как свои обязанности, так и заболевшего работника (фактор «Перенапряжение»). Основываясь на предусмотренном рисунке 2-12. (Таблица степени серьезности факторов риска для безопасности полетов) РУБП ИКАО [23] «показателю опасности перенапряжения оставшихся работников (неспособность персонала в полном объеме выполнять обязанности как свои, так и заболевшего работника)», целесообразно для дополнительного учета степеней тяжести возможного ущерба (серьезности события) использовать целочисленную пяти бальную шкалу, по которой методом экспертной оценки присваивает значения от 1 до 5. Предлагается внести градации серьезности перенапряжения, для работников, замещающих обязанности заболевших работников, как приведено в таблице 2.

Таблица 2 – Предлагаемая оценка опасности фактора «Перенапряжение», как показателя опасности факторов здоровья.

Наименование категории	Степень тяжести возможного ущерба	Присваиваемое значение показателя
Ничтожная	Замещающие работники не испытывают неудобство и некоторые ограничения при выполнении операций и работы, в целом	1
Незначительная	Замещающие работники испытывают неудобство и некоторые ограничения при выполнении операций и работы, в целом	2
Значительная	Замещающие работники не способны в полной мере справиться с выполняемой работой в пределах обычной продолжительности рабочего времени	3
Опасная	Нет уверенности в правильном и полном выполнении замещающим работником своих операций в пределах обычной продолжительности рабочего времени и необходимости сверхурочных работах	4
Катастрофическая	Замещающие работники способны в полной мере справиться с возросшими обязанностями только сверх пределов рабочего времени, предусмотренного трудовым законодательством	5

Работодателю в нашей стране недоступен весь спектр информации для анализа заболеваемости работников, невозможно выделить заболевания (состояния), вызывающие наибольшую потерю рабочего времени и других последствий, значимых для конкретной организации и/или подразделения. Это вызвано особенностями Российского законодательства по ОМО (предварительным и периодическим), выявлению отсутствия у работника медицинских противопоказаний (заболеваний или состояний) к работе, по процедуре экспертизы временной нетрудоспособности работника. В связи с этим для включения в интеграционные матрицы новых параметров, характеризующих здоровье работников, предполагается следующее.

Имеющуюся в организации информацию по: заболеваемости работников с временной утратой трудоспособности с использованием значений «число слу-

чаев отсутствия по болезни на 100 работающих»; «числу дней отсутствия по болезни на 100 работающих», «среднюю длительность одного случая отсутствия по болезни» всё это с градацией по конкретным должностям (с учетом категорий руководитель, специалист, рабочий) статистически сопоставлять в динамических рядах со значениями «внешних эффектов перенапряжения оставшихся работников». Статистические закономерности следует описывать и для них необходимо определить место в модели оценки воздействия опасности факторов производственной среды для поддержки принятия решений при организации производственных процессов ТО АТ [11].

Кроме 9 возможных комбинаций 3 факторов «Профзаболеваемость», «Травматизм», «Компетентность» по 3 категориям персонала «Руководитель», «Специалист», «Рабочий», подробно рассмотренных ранее, предлагаются дополнительные факторы «Общая заболеваемость», «Перенапряжения», в обозначении которых сохраняется и дополняется исходной нумерации факторов схемы древовидной структуры для интеграции показателей опасности, а именно:

– для рабочих (производственный состав) это: Ф1 – фактор «Профзаболеваемость» рабочих (ПзРб); Ф2 – фактор «Травматизм» рабочих (ТрРб); Ф3 – фактор «Компетентность» рабочих (КмпРб); Ф10 – фактор «Общая заболеваемость» рабочих (ОЗРб); Ф11 – фактор «Перенапряжения» рабочих (ПнРб);

– для специалистов это: Ф4 – фактор «Профзаболеваемость» специалистов (ПзСп); Ф5 – фактор «Травматизм» специалистов (ТрСп); Ф6 – фактор «Компетентность» специалистов (КмпСп); Ф12 – фактор «Общая заболеваемость» специалистов (ОЗСп); Ф13 – фактор «Перенапряжения» специалистов (ПнСп);

– для руководителей (административный состав) это: Ф7 – фактор «Профзаболеваемость» руководителей (ПзРк); Ф8 – фактор «Травматизм» руководителей (ТрРк); Ф9 – фактор «Компетентность» руководителей (КмпРк); Ф14 – фактор «Общая заболеваемость» руководителей (ОЗРк); Ф15 – фактор «Перенапряжения» руководителей (ПнРк).

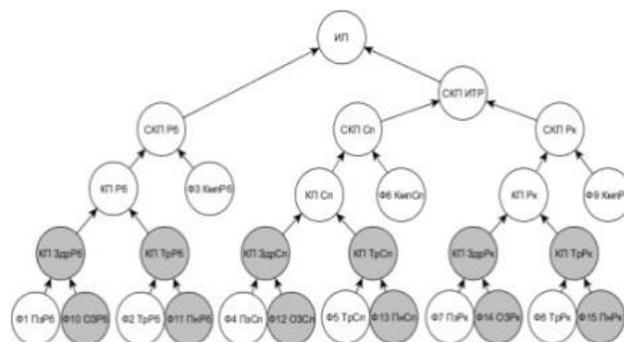


Рисунок 2 – Схема древовидной структуры для интеграции («свертки») 15-ти исходных показателей опасности факторов производственной среды производственных процессов ТО АТ

Таким образом, ранее предложенную схему древовидной структуры для интеграции («свертки») показателю

телей опасности факторов производственной среды производственных процессов ТО АТ предлагается дополнить новыми факторами (показателями) и представить в виде, приведенном на рисунке 2.

Кроме того, в дополнение к ранее предложенной схеме предлагается дополнительные факторы попарно интегрировать с факторами «Профзаболеваемость» и «Травматизм» через дополнительные промежуточные комплексные показатели КП Здр, КП Тр. В модернизированной схеме последовательность получения обобщенных показателей опасности факторов производственной среды по 3 категориям персонала (сложные комплексные показатели (СКП)) и итогового интегрального показателя опасности факторов производственной среды (ИП) не изменяется.

Предложенную ранее авторами схему древовидной структуры для интеграции («свертки») 9-ти исходных показателей опасности факторов производственной среды производственных процессов ТО АТ целесообразно дополнить факторами «Общая заболеваемость» и «Перенапряжение», а также дополнительными промежуточными комплексными показателями. Это позволит на авиапредприятиях не только обеспечить требуемые уровни производственной безопасности и безопасности полётов, а также, за счёт более высокого качества выполненных работ, обеспечить предупреждение аварий на опасных объектах, и, следовательно, эффективно защитить окружающую среду от случаев мощного аварийно-залпового загрязнения.

В дальнейших изысканиях представляется необходимым развитие описания механизмов измерения у оставшихся работников внешних эффектов перенапряжения (фактор «Перенапряжение»), разработка методов выявления, оценки и учета потенциальной опасности факторов производственной среды, преобразования результатов идентификации и оценки факторов производственной среды в соизмеримые показатели с учетом следующих трудностей и обстоятельств:

- работодатели не могут в полной мере использовать возможности анализа заболеваемости работников с временной утратой трудоспособности из-за ограничений, установленных законодательно;
- ранг значимости входящих в интеграционные матрицы параметров здоровья работников может рассчитываться работодателями самостоятельно, для чего следует использовать листки нетрудоспособности, предоставляемые работниками;
- неспособность персонала, выполняющего обязанности заболевшего работника, выполнять возросшие должностные обязанности в полном объеме может быть оценена по предложенной ранее пяти балльной шкале степеней тяжести возможного ущерба (серьезности события) для замещающих работников;
- целесообразно провести оценочный эксперимент по материалам, характеризующим процессы ТО АТ на авиапредприятии гражданской авиации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Николайкин Н.И. / Чрезвычайные ситуации последних лет на территории России // Н.И. Николай-

кин, А.Л. Рыбалкина. Безопасность в техносфере. – 2009. – № 2. – С. 41–46.

2. Худяков Ю.Г. Авиационная услуга и факторы (виды) рисков / Худяков Ю.Г. // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2009. – № 149. – С. 151–155.

3. Худяков Ю.Г. Вид рисков и особенности их проявления в авиатранспортной услуге, предоставляемой авиакомпанией / Ю.Г. Худяков, Н.И. Николайкин // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2009. – № 149. – С. 7–13.

4. Николайкин Н.И. / Экология: учебник. Сер. Высшее образование: Бакалавриат (изд. 9-е, перераб. и доп.) // Н.И. Николайкин, Н.Е. Николайкина, О.П. Мелехова. – М.: ИНФРА-М, 2018. – 615 с.

5. Николайкин Н.И. / Оценка экологической опасности авиационных событий на воздушном транспорте // Н.И. Николайкин, Е.Ю. Старков. Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2015. – № 218 (8). С. 17–23.

6. Николайкин Н.И. / Моделирование системы управления рисками при эксплуатации опасных производственных объектов // Н.И. Николайкин, Ю.Г. Худяков. Химическое и нефтегазовое машиностроение – 2012. – № 10. – С. 35.

7. Николайкин Н.И. Методология оценки влияния условий труда персонала авиапредприятий на риски в авиатранспортных процессах / Н.И. Николайкин, Ю.Г. Худяков // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2013. – № 197. – С. 115–119.

8. Иванов А.И. Динамика факторов риска производственной среды при наземном обслуживании авиационной техники / А.И. Иванов, Н.И. Николайкин, Ю.Г. Худяков // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2014. – № 204. – С. 44–49.

9. Андрусов В.Э. Законодательные и медицинские аспекты снижения опасностей факторов производственной среды авиапредприятий / В.Э. Андрусов, Ю.Г. Худяков // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2017. – Т. 20. – № 3. – С. 90–99.

10. Николайкин Н.И. О необходимости и возможности снижения воздействия человеческого фактора на безопасность полётов / Н.И. Николайкин, В.В. Цетлин, С.А. Савчуков, З.В. Пожелуева, Е.Ю. Старков // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. – 2017. – № 2. – С. 201–218.

11. Худяков Ю.Г. Управление опасностями производственной среды: монография / Ю.Г. Худяков, Н.И. Николайкин, В.Э. Андрусов. – М.: Проспект, 2017. – 128 с.

12. Николайкин Н.И. / Актуальность изучения влияния авиационных происшествий на окружающую среду // Н.И. Николайкин, Е.Ю. Старков. В сборнике: Актуальные вопросы развития науки // сборник статей Международной научно-практической конфере-

ренции: в 6 частях. Ответственный редактор А.А. Сукиасян. 2014. С. 125–132.

13. Об утверждении унифицированных форм медицинской документации, используемых в медицинских организациях, оказывающих медицинскую помощь в амбулаторных условиях и порядков по их заполнению. Приказ Минздрава России от 15.12.2014 № 834н.

14. Об официальном статистическом учёте и системе государственной статистики в РФ / Федеральный закон от 29.11.2007. № 282-ФЗ.

15. Об утверждении Федерального плана статистических работ. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 06.05.2008 № 671-р.

16. Об утверждении статистического инструментария для организации Министерством здравоохранения Российской Федерации федерального статистического наблюдения в сфере охраны здоровья. Приказ Росстата от 21.07.2016 № 355.

17. Об утверждении порядка выдачи листов не трудоспособности. Приказ Минздравсоцразвития России от 29.06.2011 № 624н.

18. Об утверждении статистического инструментария для организации Министерством здравоохранения Российской Федерации федерального статистического наблюдения в сфере здравоохранения. Приказ Росстата от 25.12.2014 № 723.

19. Об основах охраны здоровья граждан в РФ / Федеральный закон от 21.11.2011. № 323-ФЗ.

20. Об утверждении типового положения о системе управления охраной труда. Приказ Минтруда России от 19.08.2016 № 438н.

21. Игнатъева В.И. Анализ методологических особенностей исследований по изучению социально-экономического бремени заболеваний в РФ в рамках стандартной методики анализа стоимости болезни с целью ее использования в оценке технологий здравоохранения / В.И. Игнатъева, М.В. Авксентьева // Фармакоэкономика. Современная фармакоэкономика и фармакоэпидемиология – 2014. – Т. 7. – № 3. – С. 3–11.

22. Рубцов В.А. Повышение экономической эффективности управления системой здравоохранения Республики Татарстан средствами ГИС (на примере учета показателя временной утраты трудоспособности) / В.А. Рубцов, Н.К. Габдрахманов // Вестник Удмурдского университета. – 2010. – № 6–4. – С. 115–125.

23. Руководство по управлению безопасностью полетов (РУБП). Дос 9859. 3-е изд. ИКАО, 2013.

24. Основные принципы учета человеческого фактора в руководстве по техническому обслуживанию воздушных судов. Дос 9824. ИКАО, 2003.

25. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. ГОСТ Р ИСО 9000-2015. Росстандарт, 2015.

26. Руководство по документированию системы менеджмента качества ГОСТ Р ИСО/ТО 10013-2007. Росстандарт, 2007.

27. ССБТ. Системы управления охраной труда. Общие требования. ГОСТ 12.0.230-2007. Росстандарт, 2007.

28. ССБТ. Системы управления охраной труда. Руководство по применению ГОСТ 12.0.230-2007. ГОСТ 12.0.230.1-2015. Росстандарт, 2015.

*Статья поступила в редакцию 01.02.2018*

*Статья принята к публикации 15.03.2018*

УДК 699.88

## ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК ЖИДКОГО СТЕКЛА НА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ ИНЪЕКЦИОННЫХ РАСТВОРОВ

© 2018

**Панфилова Марина Ивановна**, кандидат химических наук; доцент  
кафедры физики и строительной аэродинамики

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет  
(143404, Россия, Московская область, Красногорск, 2-ой Комсомольский переулок, дом 5,  
e-mail: 012340@mail.ru)*

**Зубрев Николай Иванович**, кандидат технических наук; профессор  
кафедры «Техносферная безопасность»

*Российский университет транспорта (РУТ(МИИТ)), Российская открытая академия транспорта  
(125315, Россия, Москва, Часовая ул., д. 19/8, кв. 16. e-mail: nZubrev@mail.ru)*

**Новоселова Ольга Викторовна**, кандидат физико-математических наук; доцент  
кафедры физики и строительной аэродинамики,

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет  
(127434, Россия, Москва, Красногруденческий проезд, д.2, кв.160,  
e-mail: olganovoselova51@rambler.ru)*

**Панфилова Ирина Сергеевна**, директор ЦДД Красногорск,  
Московский финансово-юридический университет

*(143404, Россия, Московская область, Красногорск, 2-ой Комсомольский переулок, дом 5,  
e-mail: 012340@mail.ru)*

**Аннотация.** Авторами в данной статье рассматривается проблема упрочнения свойств грунтов при строительстве дорог, метрополитена, транспортных тоннелей, высотных зданий, которая возникает также при освоении подземного пространства и возросшего в последнее время внешнего техногенного воздействия. Решением данного вопроса является обеспечение повышенной прочности и долговечности строений и уменьшение потерь инъекционных цементных растворов при закреплении грунтовых массивов. В качестве добавок в инъекционных растворах часто используют жидкое стекло, которое обладает хорошими адгезионными свойствами, что обеспечивает прочность смеси. Целью работы было исследование влияния добавок жидкого стекла на механические свойства и сроки схватывания композитных систем. Установлено, что увеличение концентрации жидкого стекла увеличивает вязкость раствора, что влияет на время структурообразования. Определено, что времени схватывания образца содержащего 0,15% ОП-10 и 3г жидкого стекла вполне достаточно для транспортировки тампонажного раствора в заполняемую полость. Доказана возможность определения оптимальных соотношений количества жидкого стекла и бентонита для получения составов с определенными технологическими свойствами. Установлена возможность устранения таких фундаментальных недостатков немодифицированного жидкого стекла, как отсутствие способности к объемному твердению и низкая водостойкость.

**Ключевые слова:** композитные материалы, структурообразование, прочность композитного раствора, жидкое стекло, время схватывания.

## INFLUENCE OF LIQUID GLASS ADDITIVES ON INJECTION SOLUTION STRUCTURE

© 2018

**Panfilova Marina Ivanovna**, PhD in Chemical Sciences; Associate Professor of the Department  
“Physics and Building Aerodynamics”

*National Research University ‘Moscow State University of Civil Engineering’ (NIU MGSU)  
(143404, Russia, Moscow oblast, Krasnogorsk, 2nd Komsomolskiy pereulok, building 5, e-mail: 012340@mail.ru)*

**Zubrev Nikolay Ivanovich**, PhD in Technical Sciences; Professor of the Department “Safety Stage”  
Russian University of Transport

*Russian Open Academy of Transport  
(125315, Russia, Moscow, Chasovaya ul., 19/8, apt. 16, e-mail: nZubrev@mail.ru)*

**Novoselova Olga Viktorovna** PhD in Physical and Mathematical Sciences; Associate Professor of the Department  
“Physics and Building Aerodynamics”,

*National Research University ‘Moscow State University of Civil Engineering’ (NIU MGSU)  
(127434, Russia, Moscow, Krasnostudencheskiy proyezd, 2, apt.160, e-mail: olganovoselova51@rambler.ru)*

**Panfilova Irina Sergeevna**, Director of CDD Krasnogorsk  
Moscow University of Finance and Law

*(143404, Russia, Moscow oblast, Krasnogorsk, 2nd Komsomolskiy pereulok, building 5, e-mail: 012340@mail.ru)*

**Abstract.** The authors of this article consider the solution of the problem of strengthening the properties of soils in the construction of roads, subways, transport tunnels, high-rise buildings, increased in recent external man-made impact and problems arising in the development of underground space. The solution to this problem is to provide increased strength and durability of buildings and reduce the loss of injection cement mortars when fixing soil arrays. As additives

in injection solutions, liquid glass is often used, which has good adhesive properties, which ensures the strength of the mixture. The aim of the work was to study the effect of liquid glass additives on the mechanical properties and setting times of composite systems. It was found that the increase in the concentration of liquid glass increases the viscosity of the solution, which affects the time of structure formation. It is determined that the setting time of the sample containing 0.15% OP-10 and 3G liquid glass is sufficient to transport the grouting solution to the filled cavity. It is proved that it is possible to determine the optimal ratio of the amount of liquid glass and bentonite to obtain compositions with certain technological properties. The possibility of eliminating such fundamental shortcomings of unmodified liquid glass as the lack of capacity for volumetric hardening and low water resistance has been established.

**Keywords:** composite materials, structure formation, strength of the composite solution, liquid glass, setting time.

С увеличением техногенной нагрузки на геологическую среду за последние 10 лет резко повысилась активность карстовых процессов. Показателем этого служит ряд карстовых провалов значительных размеров.

Карст – это процесс химического и физического разрушения растворимых горных пород (карбонатного, сульфатного, хлоридного состава) под воздействием подземных и поверхностных вод [1]. По оценкам различных исследователей, карст развит примерно на одной трети поверхности суши.

В связи с активным развитием городского строительства – дорог, метрополитена, транспортных тоннелей, высотных зданий, возросшим в последнее время внешним техногенным воздействием и проблемами, возникающими при освоении подземного пространства (разрушение горных пород), особое значение приобретает проблема упрочнения свойств грунтов. Решением этой проблемы является обеспечение повышенной прочности и долговечности строений и уменьшение потерь инъекционных цементных растворов при закреплении грунтовых массивов.

Разработка состава вспененного тампонажного раствора регулируемого радиуса заполнения может значительно сократить его потери. Управление структурно-механическими свойствами раствора позволяет варьировать сроки схватывания вспененной системы. Обычно подача раствора в заполняемую полость продолжается в течение 40-50 мин. Важно, чтобы раствор терял текучесть именно в заполняемой полости, а не в трубопроводе при подаче к месту закрепления [2-5].

При закреплении пород к используемым инъекционным растворам предъявляют два основных требования. Во-первых, для легкой закачки в закрепляемую породу они должны иметь пониженную вязкость. Это достигается водоцементным соотношением не менее чем 2:1. Во-вторых, у инъекционных растворов должно быть ускоренное структурообразование, что может быть достигнуто за счет введения добавок.

Наряду с другими добавками в инъекционных растворах часто используют жидкое стекло [6-11] которое обладает хорошими адгезионными свойствами, что обеспечивает прочность смеси. На адгезионную прочность стекла влияют его физико-химические свойства: поверхностное натяжение, модуль упругости, вязкость, пористость и шероховатость зерен наполнителя, процессы полимеризации, полярность жидкого стекла и поверхности зерен наполнителя.

Данные в работе [12] свидетельствуют о целесообразности применения добавки жидкого стекла при большом раскрытии трещин или для ограничения зо-

ны тампонирувания, поскольку добавка жидкого стекла увеличивает вязкость растворов, их стабильность и жаропрочность. При исследовании [13] было отмечено, что силикатный модуль жидкого стекла в диапазоне 3,5-5 является наиболее оптимальным для получения тампонажного раствора с широким диапазоном.

Цемент можно рассматривать как химически взаимодействующую композицию тонкодисперсных порошков с водным раствором силиката натрия (жидким стеклом). Чем выше модуль жидкого стекла, тем активнее происходит его взаимодействие с цементом. Содержание жидкого стекла как компонента цемента обычно составляет 5-10% к его весу [14]. Замечено, что увеличение содержания жидкого стекла вызывает ухудшение прочностных характеристик вспененных систем.

Целью данного исследования является изучение влияния добавок жидкого стекла на механические свойства и сроки схватывания композитных систем, а также определение оптимального содержания жидкого стекла.

В работе использовали цемент марки М500, бентонит, ПАВ неионогенного типа ОП-10, жидкое стекло (ГОСТ13078-81) с целью уменьшения сроков схватывания в раннем возрасте твердения при водоцементном соотношении 2:1.

Основным составляющим инъекционного раствора является цемент. Гранулометрический состав цемента марки М500 представлен в таблице 1. Согласно полученным результатам, цемент М500 с удельной поверхностью 450 см<sup>2</sup>/г имеет преобладающий размер частиц 1-90 мкм, из них (% по массе) менее 57 мкм – 88% и менее 2мкм -12%.

Таблица 1 – Гранулометрический состав цемента М500 и бентонита

Образец	Максимальный размер частиц d <sub>95</sub> , мкм	Средний размер частиц d <sub>50</sub> , мкм	Размер частиц меньше 2 мкм, % по массе	S <sub>уд.</sub> , см <sup>2</sup> /г
Цемент М500	56,828	15,061	12,95	13504
Бентонит П2Т <sub>2</sub> А	12,270	2,969	34,23	29218

Одним из основных компонентов большинства тампонажных растворов является бентонит, имеющий большую удельную поверхность, что объясняет повышенную устойчивость системы. В работе использовали бентонит марки П2Т<sub>2</sub>А, гранулометрический состав которого представлен в таблице 1. Методом

полуколичественного рентгенофазового анализа установлено, что в его состав входит (масс. %): монтмориллонит – 75-80%, кварц – 15-17%, каолинит – 1-2 % и гидрослюда мусковитового типа 1-2 %.

В работе использовали натриевое жидкое стекло-силикат натрия, с плотностью 1,46 г/см<sup>3</sup> и силикатным модулем 2,7-3,4. В состав жидкого стекла входят, (масс. %): двуокиси кремния 21-24%; окиси железа и окиси алюминия макс. 0,25%; окиси кальция макс. 0,2%; серного ангидрида макс. 0,15%; окиси натрия 7,9-8,8%.

К основным свойствам и параметрам цементных растворов относятся, в первую очередь, растекаемость, плотность, водоотдача, седиментационная устойчивость, консистенция и сроки схватывания. Для определения сроков схватывания производились измерения прочности образцов (на пластометре Ребиндера с конусом 90°) в течение двух часов от начала приготовления. Результаты измерений представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Изменение прочности вспененной системы при введении различных концентраций жидкого стекла

Время структурообразования, τ, мин	Содержание жидкого стекла, г				
	0	1	2	3	4
	Концентрация ПАВ, %				
	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Прочность, 10 <sup>-5</sup> МПа					
15	0,29	0,53	0,76	1,02	1,32
30	0,37	0,74	1,18	1,63	2,23
45	0,52	0,95	1,73	2,45	3,1
60	0,63	1,27	2,36	3,26	4,4
75	0,88	1,62	3,12	4,33	6,05
90	1,09	2,07	3,92	5,77	7,93
105	1,33	2,64	4,78	7,64	10,45
120	1,59	3,48	6,22	10,32	15,1

Начало схватывания вспененной системы соответствует прочности 2,5х10<sup>-5</sup> МПа. Прочность определяли через 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105 и 120 минут. В табл. 2 приведено изменение прочности вспененной системы при введении жидкого стекла с концентрацией от 1% до 4% к объему смеси. (0% соответствует прочности контрольного образца).

По данным таблицы 2 построены зависимости изменения прочности вспененной системы (бентонит - ОП-10 - цемент - жидкое стекло) от времени хранения при содержании 0,15% ОП-10 и различных концентраций жидкого стекла (рисунки 1, 2).

Для определения точного времени достижения потери текучести раствора использовали графический

метод. Из графика (рисунок 1) видно, что схватывание образца содержащего 0,15% ОП-10 и 3г жидкого стекла происходит через 47 мин. Этого времени вполне достаточно для транспортировки тампонажного раствора в заполняемую полость, что соответствует ГОСТу 30515-2013 (сроки схватывания раствора).

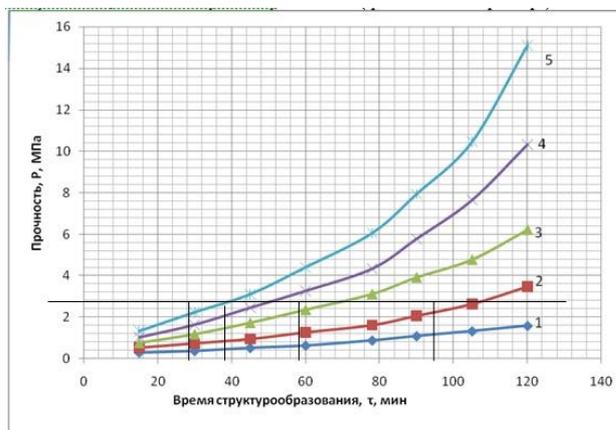


Рисунок 1 – Структурообразование композитных растворов при 0,15% ОП-10 от продолжительности хранения при различных содержаниях жидкого стекла, в %: 1-0%, 2-1%, 3-2%, 4-3%, 5-4%

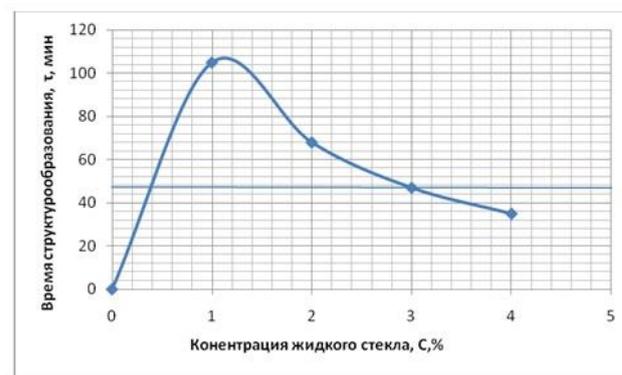


Рисунок 2 – Время структурообразования от концентрации жидкого стекла

На рисунке 2 показана зависимость времени начала схватывания системы с различным содержанием жидкого стекла при прочности системы 2,5х10<sup>-5</sup> МПа, соответствующей началу схватывания вспененной системы. Эта зависимость имеет линейный характер – с увеличением концентрации жидкого стекла растет вязкость раствора.

Установлено, что увеличение концентрации жидкого стекла увеличивает вязкость раствора, что влияет на время структурообразования.

Таким образом, доказана возможность определения оптимальных соотношений количества жидкого стекла и бентонита для получения составов с определенными технологическими свойствами. Установлена возможность устранения таких фундаментальных недостатков немодифицированного жидкого стекла, как отсутствие способности к объемному твердению и низкая водостойкость [15-21].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Соколов Д.С. Основные условия развития карста. М.: Геологиздат, 1962. 322 с.
2. Голубев А.И. Проектирование бетонных смесей: монография /А.И Голубев. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – Тверь : [б. и.], 2000. 118 с.
3. Кирпиченко Б.И., Кучернюк В.Д., Прямов Г.А. Некоторые причины неравномерности формирования цементного камня в скважине // Нефтяное хозяйство. 1983. № 2. С. 25–27.
4. Каримов И.Н. Разработка облегченных расширяющих тампонажных цементов для крепления скважин: Дис. ...к.т.н.: Уфа, – 2004. 175 с.
5. Рябова Л.И. Теория и практика направленного регулирования свойств тампонажных систем, обеспечивающих качественное крепление скважин в осложненных геолого-технических условиях, в том числе и агрессивных средах: автореферат дис. На соискание учен. ст. д.т.н. /ОАО НПО «Бурение» – Краснодар, – 2005. – 47 с.
6. Василик Г.Ю. Цементная промышленность России в 2013 году / Г.Ю. Василик // Цемент. 2013. – № 6. С. 20–33.
7. Борсук П.А., Лясс А.М. Жидкие самотвердеющие смеси. М.: Машиностроение, 1979. 255 с.
8. Сычев М.М. Неорганические клеи. Л.: Химия. 1986. – 152 с.
9. Самойленко В.В., Фирсов В.В. Формирование структуры ячеистого теплоизоляционного материала из жидкостекольной композиции холодного твердения // Стекло и керамика. 2011. № 8. С. 14–16.
10. Лотов В.А., Кутугин В.А. Термопеносиликатные изделия на основе жидкостекольных композиций // Стекло и керамика. 2008. № 1. С. 6–10.
11. Усова Н.Т., Лотов В.А., Лукашевич О.Д. Водостойкие безавтоклавные силикатные строительные материалы на основе песка, жидкостекольных композиций и шламов водоочистки // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 2. С. 276–284.
12. Хямеляйнен В.А. Формирование цементных завес вокруг капитальных горных выработок / В.А. Хямеляйнен, Ю.В. Бурков, П.С. Сыркин. – М.: Недра, 1994. 400 с.
13. Королев Е.В. Модель структуры жидкостекольных композиционных материалов специального назначения / Е.В. Королев, А.Н. Гришина // Региональная архитектура и строительство. – 2010. № 2. С. 14–19.
14. Зубрев Н.И., Горяйнова С.К., Панфилова М.И. Структурообразование и физико-химические свойства отвержденных растворов / Н.И. Зубрев, С.К. Горяйнова, М.И. Панфилова // Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта. – М., РГОТУПС, 2003. – С. 186.
15. Гришина А.Н. Прочность жидкостекольных композитов, отвержденных ферроборовым шлаком / А.Н. Гришина, Е.В. Королев // Строительные материалы. – 2012. – № 6. – С. 66–68.
16. Королев Е.В. Радиационно-защитные и химически стойкие серные строительные материалы. / Е.В. Королев, Ю.М.Баженов, А.И. Альбакасов. Пенза–Оренбург. [б. и.], – 2010. 364 с.
17. Королев Е.В., Гришина А.Н. Прочность радиационнозащитных композиционных материалов на основе жидкого стекла // Материалы международного конгресса: Наука и инновации в строительстве: современные проблемы строительного материаловедения и технологии. Воронеж: ВГАСУ, 2008. Т. 1. С. 123–127.
18. Корнеев В.И., Данилов В.В. Производство и применение растворимого стекла. Жидкое стекло. Л.: Стройиздат. Ленингр. отд., 1991. 176 с.
19. Иванов, М.Ю. Особенности формирования структуры и свойств модифицированной жидкостекольной композиции / М.Ю. Иванов // Системы. Методы. Технологии. – 2013. – № 3 (19). – С. 156–163.
20. Кудяков А.И., Радина Т.Н., Иванов М.Ю. Зернистый теплоизоляционный материал на основе модифицированного жидкого стекла из микрокремнезема // Строительные материалы. 2004. № 11. С. 12.
21. Глуховский, В. Д. Шлакощелочные цементы и бетоны / В.Д. Глуховский, В.А. Пахомов. – Киев: Будивельник, 1978. – 184 с.

*Статья поступила в редакцию 30.01.2018*

*Статья принята к публикации 14.03.2018*

УДК 629.735.33

## УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ ДЛЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЕТОВ, СВЯЗАННЫМИ С НЕБЛАГОПРИЯТНЫМИ МЕТЕОУСЛОВИЯМИ

© 2017

**Рыбалкина Александра Леонидовна**, кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности полетов и жизнедеятельности

*Московский государственный технический университет гражданской авиации  
(125993, Россия, г. Москва, Кронштадтский б-р, д. 20, e-mail: rybalkina@list.ru)*

**Трусова Елена Игоревна**, магистрант

*Московский государственный технический университет гражданской авиации  
(125993, Россия, г. Москва, Кронштадтский б-р, д. 20, e-mail: elenatru2011@yandex.ru)*

**Шаров Валерий Дмитриевич**, доктор технических наук, профессор кафедры безопасности полетов и жизнедеятельности

*Московский государственный технический университет гражданской авиации  
(125993, Россия, г. Москва, Кронштадтский б-р, д. 20, e-mail: vdsharov@mail.ru)*

**Аннотация.** Авиация находится в большой зависимости от погодных условий, так как вся ее деятельность происходит в атмосфере. В полете на самолет оказывают влияние температура, давление воздуха, направление и скорость ветра, количество, характер и высота облаков, осадки и т.д. Применяемое оборудование для обеспечения безопасности полетов в сложных метеоусловиях, не исключает зависимость авиации от погоды. В мировой авиационной практике известны случаи авиационных происшествий, связанных с попаданием воздушных судов в сложные метеоусловия.

В статье приведен анализ статистики авиационных происшествий, связанных с влиянием метеоусловий. Проанализировано распределение авиационных происшествий по видам авиации, по видам погодных условий, по типам воздушных судов и показано, что наибольшее количество авиационных происшествий, связанных с влиянием метеоусловий происходит с вертолетами.

В статье рассмотрены причины авиационных происшествий, связанных с неблагоприятными метеоусловиями для вертолетов, причины неполучения экипажем актуальной информации о неблагоприятных метеоусловиях, а также проблемы, связанные с пилотированием вертолетов. Была показана целесообразность оценки риска, связанные с неблагоприятными метеоусловиями перед выполнением конкретных полетов.

Проанализированы известные методики оценки риска для безопасности полетов и доработана методика оценки рисков на предстоящий полет с учетом особенностей эксплуатации вертолетов. Показано, что использование предложенной методики позволит своевременно идентифицировать полеты с повышенным уровнем риска для безопасности полетов.

**Ключевые слова:** метеоусловия, оценка рисков, безопасность полетов.

## SAFETY RISK MANAGEMENT RELATED TO ADVERSE WEATHER CONDITIONS

© 2017

**Rybalkina Alexandra Leonidovna**, PhD in Technical Science, Associate Professor of the Department "Flight and Life Safety"

*Moscow State Technical University of Civil Aviation  
(125993, Moscow, Kronshadttsky blvd, 20, e-mail: rybalkina@liul.ru)*

**Trusova Elena Igorevna**, Graduate student

*Moscow State Technical University of Civil Aviation  
(125993, Moscow, Kronshadttsky blvd, 20, e-mail: elenatru2011@yandex.ru)*

**Sharov Valery Dmitriyevich**, Doctor of Technical Science, Professor of the Department "Flight and Life Safety"

*Moscow State Technical University of Civil Aviation  
(125993, Moscow, Kronshadttsky blvd, 20, e-mail: vdsharov@mail.ru)*

**Abstract.** Aviation is highly dependent on weather conditions, since all its activities take place in the atmosphere. In flight, the airplane is affected by temperature, air pressure, wind direction and speed, number, nature and height of clouds, precipitation, etc. The equipment used to ensure flight safety in difficult weather conditions does not exclude the dependence of aviation on weather. In the world aviation practice, cases of aviation accidents involving the entry of aircraft into difficult weather conditions are known.

The article analyses the statistics of aviation accidents connected with the influence of meteorological conditions. The distribution of aviation accidents by types of aviation, by types of weather conditions, by aircraft types is analyzed and it is shown that the greatest number of accidents related to the influence of meteorological conditions occurs with helicopters.

The article considers the causes of aviation accidents associated with unfavorable weather conditions for helicopters, the reasons for the crew's failure to receive up-to-date information on adverse weather conditions, as well as the problems associated with piloting helicopters. It was shown the expediency of assessing the risks associated with adverse weather conditions before the implementation of specific flights.

The known methods of risk assessment for flight safety have been analyzed and the methodology for risk assessment for the forthcoming flight has been finalized taking into account the specifics of helicopter operation. It is shown that the use of the proposed methodology will allow timely identification of flights with an increased risk level for flight safety.

**Keywords:** weather conditions, risk assessment, flight safety.

Обеспечение безопасности полетов (БП) гражданских воздушных судов (ВС) – сложная задача, которая решается совместным трудом проектировщиков и изготовителей авиационной техники, а также ее эксплуатантов [1].

При эксплуатации ВС на БП влияют следующие факторы [2]:

1. Человеческий фактор – люди в той обстановке, в которой они живут и трудятся, взаимодействуют с машинами, процедурами и окружающей обстановкой, а также между собой;

2. Технический фактор – включает характеристики ВС и другой авиационной техники, средства навигации и управления воздушным движением;

3. Неблагоприятные внешние условия – события или явления во внешней среде, которые создают угрозу безопасности полета: БП неблагоприятные метеорологические условия, большие скопления птиц в воздухе, наличие спутных следов от ранее пролетевших самолетов и т. д.

Сложные метеоусловия и опасные метеоявления всегда представляли и представляют угрозу для авиации, поэтому совершенствование методов управления рисками, связанными с этими факторами [3], является актуальной задачей теории и практики обеспечения БП.

Авиапредприятия прилагают огромные усилия для снижения рисков и угроз безопасности, уменьшения уровня аварийности, однако достижение абсолютной безопасности невозможно и время от времени происходят те или иные отклонения от нормы работы, и наиболее тяжелыми их последствиями, являются [4] авиационные происшествия.

Каждое авиационное происшествие, сопровождающееся массовой гибелью людей, становится трагедией международного масштаба. Помимо этого колоссальный ущерб наносится имуществу гражданской авиации и экологическим системам [5] на территории, где произошло авиационное происшествие.

**Анализ влияния метеоусловий на безопасность полетов.** Распределение факторов, обусловивших авиационные происшествия в период с 2010–2015 гг. выглядит следующим образом [6]. Наибольшее количество авиационных происшествий (77%) связано с человеческим фактором, 20% связаны с отказами и неисправностями авиационной техники, 3% – с неблагоприятными внешними условиями.

Неблагоприятные внешние условия, в первую очередь неблагоприятные метеоусловия [7], помимо основной причины авиационного происшествия, могут также выступать в качестве сопутствующего фактора. В большом количестве авиационных происшествий прослеживается совокупное воздействие неблагоприятных внешних условий и человеческого фактора, а значит необходимо более подробно изучить и проанализировать авиационные происшествия, в которых имело место воздействие неблагоприятных внешних условий.

Далее проанализируем влияние неблагоприятных метеоусловий на безопасность полетов и рассмотрим раз-

личные пути снижения риска авиационных происшествий.

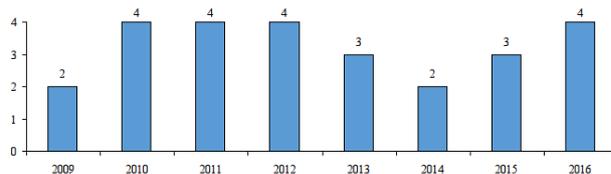


Рисунок 1 – Число авиационных происшествий в государствах-участниках Соглашения, связанных с влиянием неблагоприятных метеоусловий, за 2009–2016 гг.

В работе был проведен анализ статистики авиационных происшествий в гражданской авиации, произошедших с ВС государств-участников Соглашения о гражданской авиации и использованию воздушного пространства 1991 г по статистике МАК в период с 2009 по 2016 годы, связанных с влиянием метеоусловий [8, 9]. Результаты представлены на рисунке 1. Можно видеть, что с 2012 года наблюдалась тенденция к снижению числа авиационных происшествий, однако, с 2015 года число авиационных происшествий снова стало расти.

Анализ распределения авиационных происшествий по видам авиации показал, что с воздушными судами коммерческой авиации произошло 62%, 38% – с воздушными судами авиации общего назначения.

Наибольшее количество авиационных происшествий происходило с вертолетами – 80%, с самолетами – 20%, из которых 12% с легкими и сверхлегкими самолетами, 8% – с тяжелыми самолетами.

Наиболее частыми погодными условиями, в которых возникают проблемы, являются (рисунок 2): грозовая деятельность, обледенение в облаках, сплошная слоистая облачность, турбулентность, снегопад, метель, сильный порывистый ветер, ливневые осадки, туман, кучево-дождевая облачность, ограниченная видимость, дымка.



Рисунок 2 – Виды неблагоприятных метеоусловий, оказавших влияние на развитие авиационных происшествий в гражданской авиации РФ за 2009–2016 гг.

Помимо этого, был выявлен ряд проблем, связанных с неполучения экипажем актуальной информации о неблагоприятных метеоусловиях. В их числе:

- неоправдавшийся прогноз погоды (56%),
- случаи, когда экипаж за метеоинформацией не обращался (33%),
- отсутствие прогноза погоды по маршруту (11%).

В настоящее время в крупнейших аэропортах страны в рамках федеральной целевой программы "Модернизация Единой системы организации воздушного движения Российской Федерации (2009–2015 годы)" внедрены перспективные системы и технологии метеорологического обеспечения аэронавигации, аэродромы оснащаются радиолокационными средствами. Данные мероприятия позволяют увеличить существующий уровень БП за счет улучшения качества и полноты метеоинформации, а также за счет повышения оперативности прогнозов опасных метеоявлений. В результате реализации программы оправдываемость прогнозов погоды возрастет до 88,5% [10].

Так как наибольшее количество авиационных происшествий, связанных с влиянием неблагоприятных метеоусловий, происходит с вертолетами, были проанализированы причины авиационных происшествий отдельно для вертолетов (таблица 1). В большинстве случаев прослеживается совокупное воздействие неблагоприятных метеоусловий и человеческого фактора. Наибольшее количество авиационных происшествий связано с нарушением метеоминимума и полетом в условиях, не соответствующих правилам визуальных полетов (ПВП). Помимо этого, отмечаются потеря пространственной ориентировки в условиях ограниченной видимости, попадание хвостового винта в режим «вихревого кольца» в условиях снежного вихря, обледенение карбюратора двигателя при попадании в ливневые осадки.

Таблица 1 – Распределение причин авиационных происшествий, связанных с неблагоприятными метеоусловиями, для вертолетов за 2009–2016 гг.

Причины авиационных происшествий	Доля, %
Потеря пилотом пространственной ориентировки при выполнении полета в условиях, не соответствующих ПВП	33
Непринятие экипажем решения о прекращении полета, при попадании в метеоусловия, не соответствующие ПВП	33
Потеря экипажем пространственной ориентировки в условиях ограниченной видимости	10
Попадание хвостового винта в режим «вихревого кольца» в условиях снежного вихря.	10
Потеря пилотом пространственной ориентировки при выполнении взлёта в сложных метеоусловиях	5
Обледенение карбюратора двигателя при попадании вертолётa в ливневые осадки.	5
Нескоординированные действия КВС, приведшие к раскачке груза на внешней подвеске в условиях, не соответствующих ПВП	5

В ходе анализа авиационных происшествий были выявлены проблемы, связанные с пилотированием. Для вертолетов это:

- полет в условиях, не соответствующих ПВП – 53%,
- полет ниже метеоминимума – 21%,
- несвоевременное принятие решения об уходе на второй круг в условиях снежного вихря – 11%,
- непринятие решения об уходе на второй круг при отсутствии визуального контакта с наземными ориентирами – 5%,
- неправильные действия экипажа при попадании в сложные метеорологические условия – 5%,
- выполнение полета в ливневых осадках – 5%.

**Применимость некоторых методов управления риском для БП к рискам, связанным с метеоусловиями.** В настоящее время в мировой гражданской авиации можно выделить два подхода к обеспечению БП [11]. Первый подход основан на создании и внедрении системы норм, касающихся действий, которые должны предприниматься повсеместно для достижения заданного уровня БП при конструировании, производстве, эксплуатации ВС, включая техническое обслуживание ВС, управление воздушным движением, аэродромное обслуживание.

Общепризнанно, что такой «нормативный» подход, при всей его важности, исчерпал свои возможности и не может обеспечить требуемое повышение уровня БП.

Второй подход, являющийся приоритетным и получивший название «управление БП», предполагает, в соответствии с SARPс ИКАО [12], необходимость создания и функционирования в государствах Государственных программ БП, а в организациях-поставщиках авиационного обслуживания – систем, управления БП (СУБП). Ядром СУБП является управление риском для БП, сущность которого состоит в выявлении факторов опасности, оценке приемлемости риска событий, связанных с их проявлением, и разработке (при необходимости) корректирующих и предупреждающих мероприятий.

Управление риском для БП в полной мере относится и к рискам, связанным с проявлением факторов опасности внешней среды.

Известно достаточно большое количество способов и методов управления риском [13], но ИКАО в Руководстве по управлению БП [14] рекомендует использовать только один из них, который в указанном ГОСТ называется «матрица последствий и вероятностей».

Этот метод, известный еще как «матрица ИКАО», предполагает оценку риска в рамках «технократической концепции» как сочетание вероятности негативного события и серьезности его проявления с помощью буквенно-цифрового индекса, в зависимости от значения которого производится оценка приемлемости риска с помощью специальной матрицы. Метод понятен, прост в применении и может использоваться и непрофессионалами, но имеет известные ограничения, подробно разобранные в статье [15].

В частности, метод применим только для оценки риска отдельных событий и не позволяет оценивать так называемые «интегральные риски» полета в целом. Поэтому в авиапредприятиях используются и другие методы, приведенные в [13] а также разрабатываются собственные оригинальные методы [16].

Возвращаясь к вопросу влияния метеоусловий на БП, отметим, что матрица ИКАО применима только к оценке риска отдельных факторов среды, например, отдельно риска, связанного с обледенением, отдельно – боковым ветром на посадке и т.д. и не позволяет получить целостную картину общего риска от воздействия неблагоприятных метеоусловий в предстоящем полете.

Вместе с тем, можно выделить два достаточно широко применяемых в российских и зарубежных авиакомпаниях метода управления риском, лишенных этого недостатка.

1. Метод управления риском столкновения исправного воздушного судна с землей (CFIT – Controlled Flight Into Terrain).

2. Метод (инструмент) оценка риска предстоящего полета (FRAT – Flight Risk Assessment Tool).

В отличие от матрицы ИКАО, эти также сравнительно простые методы, претендуют на роль методов оценки полного (интегрального) риска. При этом, если первый оценивает риск только для одного типа событий и этапа полета (заход на посадку и посадка), то второй применяется для оценки риска полета в целом.

Рассмотрим возможности применения этих методов для оценки воздействий среды подробнее.

**Методика оценки риска «Контрольный перечень CFIT».** Программы всемирного фонда безопасности полетов [17] предполагает оценку риска экипажем при подготовке к заходу на посадку. Она разработана Всемирным фондом безопасности полетов для оценки риска столкновений исправных воздушных судов с землей (CFIT) в рамках своей международной программы по сокращению количества авиационных происшествий по причине CFIT, которые представляют большую опасность для воздушных судов, экипажей и пассажиров.

Контрольный перечень состоит из трех частей, в каждой из которых различным опасным факторам присвоены числовые значения, которые используются пилотами при оценке суммарного риска захода на посадку. В первой части «Оценка степени риска» уровень риска рассчитывается для каждого полета, сектора или участка. Во второй части «Факторы, снижающие риск» факторами риска, являются корпоративная культура, правила полетов, знание опасности и подготовка оборудования ВС. В третьей части «Ваш показатель риска» приведены итоговые баллы по оценке уровня риска захода на посадку и принятия решения экипажа по целесообразности захода на посадку в рассмотренных ограничениях полета или принятия решения по изменению

условий захода на посадку (выбор системы захода, режима полета и т. д.).

Отметим, что данная методика, рассматривает только заход на посадку, а не весь полет и содержит только один показатель, учитывающий влияние метеоусловий.

**Методика FRAT** (оценка риска на предстоящий полет), разработанная Федеральной авиационной администрацией США позволяет определить уровень риска в условных единицах (баллах) для рассматриваемого полета на этапе его подготовки в зависимости от типа операции, окружающей среды, используемых воздушных судов, подготовки экипажей и общего опыта эксплуатации [18]. Далее, полученное значение риска сравнивается с некоторыми, заранее установленными пороговыми значениями, и в зависимости от результатов сравнения предлагается внести корректировки в состав экипажа, предполетную подготовку, изменить время вылета, выбор запасных аэродромов и т.д. Эффективность мероприятий может быть оценена по методике, приведенной в работе [19].

В перечень оцениваемых факторов риска FRAT входят 3 категории.

Первая категория «Квалификация членов летного экипажа ВС» включает такие параметры, как: налет членов экипажа; рабочее время и время отдыха экипажа, летное время экипажа и время отдыха экипажа во внебазовом аэропорту менее 12 часов до начала рабочего времени.

Вторая категория «Условия эксплуатации ВС» включает информацию об аэродроме, времени суток, метеоинформацию, наличие грозы на аэродроме вылета или назначения, наличие турбулентности, наличие сильного ливневого дождя, бокового ветра, обледенения.

Третья категория «Оборудование ВС» включает особые ограничения по РЛЭ или же наличие отказов и наличие полета по специальному разрешению.

Из рассмотренных методик только методика FRAT оценивает риски на весь предстоящий полет. Помимо этого, только в данной методике в разделе «Условия эксплуатации ВС» учитываются различные метеоусловия, а также другие неблагоприятные внешние условия предстоящего полета.

Однако в рассмотренных авиационных происшествиях с вертолетами имели место также другие специфические метеоусловия, которые оказали серьезное влияние на безопасность полетов, являясь основной или сопричастующей причиной авиационных происшествий. Поэтому были предложены дополнительные показатели, оценивающие влияние метеоусловий для вертолетов.

На основании экспертной оценки, проведенной в одной из авиакомпаний, эксплуатирующих вертолеты, по методике, приведенной в монографии [20] были предложены следующие численные значения показателей уровня риска (таблица 2):

Таблица 2 – Показатели уровня риска

№ п/п	Показатель	Численное значение
1	Образование тумана на маршруте полета	3
2	Сильный снегопад и метели на а/д вылета и/или назначения	3
3	Имевшие место в течение года случаи неоправдавшегося прогноза погоды	3
4	Имевшие место в течение года случаи несвоевременного информирования об изменениях погоды по данному маршруту	3
5	Имевшие место в течение года случаи непринятия пилотом решения об уходе на второй круг / на запасной аэродром при наличии метеоусловий ниже минимумов для посадки	4
6	Полет ночью в сложных метеоусловиях	3
7	Условия, способствующие образованию снежного вихря	4
8	Отсутствие у пилота опыта пилотирования ВС по приборам	3
9	Отсутствие у пилота опыта взлета при метеоминимуме	3
10	Имевшие место в течение года случаи вылета при минимуме менее посадочного и отсутствии пригодного аэродрома в часе полета на одном двигателе	3
11	Отсутствие у пилота опыта взлетов/посадок с предельной составляющей бокового ветра	3

Результаты расчетов уровня риска нескольких авиационных происшествий, произошедших в период с 2009 по 2016 гг., в которых в качестве основной или сопутствующей причины имело место влияние неблагоприятных метеоусловий, показывают, что уровень риска по доработанной методике превышает методику FRAT на 3-5 баллов. Во многих случаях риск по доработанной методике был равен или превышал уровень риска в 25 баллов, который часто используется в авиакомпаниях как уровень риска, при котором требуются корректирующие мероприятия.

Таким образом, введение данной методики оценки риска может помочь своевременно выявить полеты с повышенным уровнем риска и провести мероприятия по его сокращению.

Как показал анализ статистики авиационных происшествий последних лет, факторы внешней среды, в частности, неблагоприятные метеоусловия, продолжают оказывать существенное влияние на БП, поэтому задача управления риском предстоящего полета должна включать оценку рисков, связанных с метеоусловиями.

Установлено, что метод оценки риска, рекомендованный ИКАО, не позволяет оценить совокупный (ин-

тегральный риск) предстоящего полета, в том числе, связанный с метеоусловиями, а метод CFIT Всемирного Фонда БП рассматривает только один тип событий, один этап полета и крайне ограниченно учитывает метеофакторы.

Изучение возможности применения методики FRAT, разработанной ФАУ США, для оценки риска в полетах, закончившихся авиационными происшествиями, показало, что данная методика позволяет в ряде случаев выявить полет повышенного риска, в том числе по факторам среды, на стадии подготовки к нему и, соответственно, может быть практически полезна как один из дополнительных методов управления риском для БП.

Однако обязательным условием эффективного применения FRAT является его адаптация к деятельности конкретного эксплуатанта с использованием научно обоснованных методов экспертного оценивания. Такая работа, проведенная авторами статьи в одной из авиакомпаний, эксплуатирующих вертолеты, позволила существенно улучшить качество оценок и повысить полезность метода для практической деятельности авиакомпаний.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Николайкин Н.И. Рыбалкина А.Л. Чрезвычайные ситуации последних лет на территории России // Безопасность в техносфере. 2009. № 2. С. 41–46.
2. Николайкин Н.И., Зубков Б.В., Рыбалкина А.Л. Анализ статистики чрезвычайных ситуаций в современной гражданской авиации // Проблемы анализа риска. 2008. Т. 5. № 1. С. 38–52.
3. Шаров В. Д. Оценка влияния среды на безопасность полетов. // Научный вестник МГТУ №192, 2013, С. 47–54.
4. Николайкин Н.И., Старков Е.Ю. Уменьшение экологических последствий от воздействия авиационных происшествий // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2016. № 225. С. 129–136.
5. Николайкин Н.И. Новые приоритеты в сфере защиты окружающей среды от воздействия гражданской авиации // Безопасность в техносфере. 2013. Т. 2. № 5 (44). С. 25–30.
6. Рыбалкина А.Л., Спиринов А.С. Развитие радиолокационного геофизического мониторинга окружающей среды с целью повышения безопасности полетов // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2015. № 222. С. 138–42.
7. А.Л. Рыбалкина, А.С. Спиринов, Е.И. Трусова. Уменьшения вероятности попадания электрических разрядов на воздушные суда в районе малых аэродромов. // Инновации в гражданской авиации. – М.: МГТУ ГА, 2017. Т.2. №2. С. 99–105.
8. Межгосударственный авиационный комитет. Информация. Доклады о состоянии безопасности полетов в гражданской авиации. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mak.ru/> (11.04.16)

9. Межгосударственный авиационный комитет. Отчеты о состоянии безопасности полетов. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mak-iac.org/rassledovaniya/bezopasnost-poletov/> (23.12.17)

10. Программа "Модернизация Единой системы организации воздушного движения Российской Федерации (2009 – 2020 годы)" [Электронный ресурс]. URL:<http://fcp.economy.gov.ru/cgi-bin/cis/fcp.cgi/Fcp/ViewFcp/View/2010/251/> (12.01.17).

11. Зубков Б.В., Сакач Р.В., Костиков В.А. Безопасность полетов. Часть 1-3. – М.: МГТУГА, 2007.

12. Приложение 19 к Конвенции о международной гражданской авиации. Управление безопасностью полетов. ИКАО, 2013.

13. ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010 – 2011 Менеджмент риска. Методы оценки риска. М.: Изд-во стандартов, 2011.

14. Руководство по управлению безопасностью полетов (РУБП). Дос.9859. ИКАО, 3-е изд., 2013.

15. Шаров В.Д. Воробьев В.В. Ограничения по использованию матрицы ИКАО при оценке рисков для безопасности полетов. Научный вестник МГТУ ГА, № 225, 2016, С. 179–187.

16. Зубков, Б.В. Шаров В.Д. Теория и практика определения рисков в авиапредприятиях при разработке системы управления безопасностью полетов. – М.: МГТУ ГА, 2010, 196 с.

17. Программы всемирного фонда безопасности полетов [Электронный ресурс]. URL <http://pandia.ru/text/78/590/43993-3.php> (12.01.17).

18. Flight Risk Assessment Tool [Электронный ресурс]. URL <https://www.nbaa.org/admin/sms/info07015.pdf> (12.01.17).

19. Гузий А. Г., Шаров В. Д. Методологический подход к априорной оценке эффективности мероприятий по предотвращению авиационных происшествий. – Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. №6, М., 2006, С.76–79.

20. Гузий А.Г., Лушкин А.М., Майорова Ю.А. Теория и практика экспертного анализа в системах управления безопасностью полетов: монография. – М.: ИД Академии Жуковского, 2015.

*Статья поступила в редакцию 18.01.2018*

*Статья принята к публикации 14.03.2018*

УДК 519.87

## КРИТЕРИЙ ГУРВИЦА ДЛЯ ПРОВЕРКИ УСТОЙЧИВОСТИ ЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ОКРЕСТНОСТНЫХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

© 2018

**Седых Ирина Александровна**, кандидат физико-математических наук, доцент,  
доцент кафедры «Высшая математика»

*Липецкий государственный технический университет*  
(398055, Россия, Липецк, улица Московская, 30 e-mail: sedykh-irina@yandex.ru)

**Сметанникова Анастасия Михайловна**, студентка  
*Липецкий государственный технический университет*  
(398055, Россия, Липецк, улица Московская, 30 e-mail: n.smetannickowa@yandex.ru)

**Аннотация.** Существует множество классов окрестностных моделей, простейшими из них являются симметричные линейные и билинейные окрестностные модели, основные принципы которых описаны в [1-3]. Для окрестностных моделей в работах [4-6] рассмотрены алгоритмы идентификации и управления. Целью данной работы является проверка на устойчивость динамических окрестностных моделей, которые используются для представления пространственно-распределенных систем, а также являются перспективным направлением в моделировании сложных производственных систем [7], таких как предел текучести стали после непрерывного отжига [8], цементное производство [9], процесс очистки сточных вод и другие [10]. В статье представлены очистные сооружения, приведен состав очистных сооружений для системы очистки сточных вод. Процесс очистки сточных вод представлен в виде линейной динамической окрестностной модели, для которой была произведена параметрическая идентификация. Дано определение устойчивости модели, показан общий вид характеристического уравнения и достаточное условие устойчивости динамической системы. Рассмотрен алгоритм проверки устойчивости дискретной динамической окрестностной системы по критерию Гурвица. Проведено исследование линейной динамической окрестностной модели на устойчивость по данному критерию и сделан вывод. Работа является актуальной и несет в себе новизну, так как ранее исследование на устойчивость окрестностных моделей не рассматривалось, и была предложена оригинальная идея проверки дискретной динамической окрестностной системы на устойчивость по критерию Гурвица.

**Ключевые слова:** классы окрестностных моделей, моделирование сложных систем, очистные сооружения, сточные воды, линейная динамическая окрестностная модель, параметрическая идентификация, устойчивость, процесс очистки сточных вод, критерий Гурвица.

## HURVITS CRITERION FOR VERIFICATION OF SUSTAINABILITY OF LINEAR DYNAMIC NEIGHBORHOOD MODELS OF THE WASTEWATER TREATMENT PROCESS

© 2018

**Sedykh Irina Alexandrovna**, PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,  
associate Professor of the Department «Higher Mathematics»

*Lipetsk State Technical University*  
(398055, Russia, Lipetsk, Moskovskaya ul., 30, e-mail: sedykh-irina@yandex.ru)

**Smetannikova Anastasiya Mikhailovna**, student  
*Lipetsk State Technical University*  
(398055, Russia, Lipetsk, Moskovskaya ul., 30, e-mail: n.smetannickowa@yandex.ru)

**Abstract.** There are many classes of neighborhood models, the simplest of them are symmetric linear and bilinear neighborhood models, the main principles of which are described in [1-3]. For neighborhood models, the algorithms of identification and control are considered in [4-6]. The purpose of this paper is to test the stability of dynamic neighborhood models, which are used to represent spatially distributed systems, and also are a promising direction in modeling complex production systems [7], such as the yield strength of steel after continuous annealing [8], cement production [9], wastewater treatment process and others [10]. The article presents treatment facilities, the composition of sewage treatment plants for the sewage treatment system. The wastewater treatment process is presented as a linear dynamic neighborhood model for which a parametric identification was made. A definition of the stability of the model is given, a general form of the characteristic equation is shown and a sufficient condition for the stability of the dynamical system. An algorithm for checking the stability of a discrete dynamical neighborhood system by the Hurwitz criterion is considered. A linear dynamical neighborhood model is studied for stability by this criterion and a conclusion is drawn. The work is timely and carries novelty, since earlier the study of the stability of neighborhood models was not considered, and the original idea of testing a discrete dynamic neighborhood system for stability by the Hurwitz criterion was proposed.

**Keywords:** classes of neighborhood models, modeling of complex systems, treatment facilities, sewage, linear dynamic neighborhood model, parametric identification, stability, wastewater treatment process, Hurwitz criterion.

Окрестностные модели обобщают многие дискретные системы, основные принципы которых изложены в [11-16], их применяют для моделирования сложных систем. В работе рассматриваются динамические линейные окрестностные модели [4-5, 17]. В данной статье с помощью окрестностных моделей исследуется процесс очистки сточных вод.

Динамические окрестностные модели ранее не исследовались на устойчивость, однако любая динамическая система изменяется во времени, и при решении задач необходимо, чтобы такие системы стремились к состоянию равновесия. Таким образом, исследование устойчивости динамических окрестностных моделей является важной частью анализа рассматриваемых окрестностных систем.

В работе устойчивость динамических моделей исследуется по критерию Гурвица.

**Окрестностные модели процесса очистки сточных вод.** Очистные сооружения содержат оборудование для очистки промышленных и хозяйственных сточных вод. Они представляют собой комплекс оборудования, который состоит из емкостей, трубопроводного материала, механизмов, контрольно-измерительных приборов, системы управления, установленных в технологическую цепочку для последовательного выполнения операций по очистке сточных вод от загрязнений. Такой комплекс работает в автоматическом режиме.

Состав очистных сооружений: аэрируемые песколовки для удаления песка; первичные отстойники для отстаивания и удаления жиров и нефтепродуктов; резервуар-усреднитель – усредняет стоки по количественному расходу и показаниям pH; биореакторы типа SBR – с помощью процессов нитри-денитрификации проводят биологическую очистку; промежуточный резервуар – накапливает условно чистую воду перед очисткой на фильтрах доочистки; резервуар чистой воды перед сбросом в водоем [18-20].

Смоделируем процесс очистки сточных вод с помощью динамических окрестностных систем.

Выделим пять крупных узлов процесса  $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ , представленных на рисунке 1 [21].

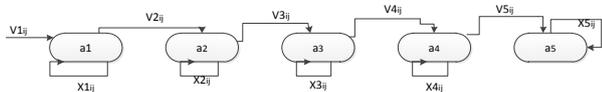


Рисунок 1 – Граф динамической окрестностной модели процесса очистки сточных вод

На рисунке 1 показана зависимость состояний и выходов динамической окрестностной модели в каждом узле в следующий момент времени от состояний и входов в текущий момент времени, где  $i = 1, \dots, 5; j = 1, \dots, 7; v_{ij} = x_{i-1, j}$ .

Узлы окрестностной модели  $A = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\}$ , где  $a_1$  – узел входных данных,  $a_2$  – узел первичных

отстойников,  $a_3$  – узел усреднителя,  $a_4$  – узел биореактора № 1,  $a_5$  – узел биореактора № 2.

Состояния каждого  $i$ -го промежуточного узла вычисляются по следующим формулам [4-6]:

$$x_{ij}(t+1) = \varphi_{ij}(v_{i1}(t), v_{i2}(t), v_{i3}(t), \dots, v_{i7}(t), x_{i1}(t), \dots, x_{i7}(t)),$$

где  $\varphi_{ij}$  – функции пересчета состояний;  $v_{ij}(t)$  – входы в момент времени  $t+1$ ;  $x_{ij}(t+1)$  – состояния в момент времени  $t+1, i = 1, \dots, 5, j = 1, \dots, 7$ .

Рассмотрим линейную динамическую окрестностную модель (1):

$$x_{ij}(t+1) = a_{ij0} + a_{ij1} \cdot v_{i1}(t) + \dots + a_{ij7} \cdot v_{i7}(t) + b_{ij1} \cdot x_{i1}(t) + \dots + b_{ij7} \cdot x_{i7}(t). \quad (1)$$

Запишем (1) в матричном виде:

$$X_i(t+1) = A_{i0} + A_i V_i(t) + B_i X_i(t),$$

где  $X_i(t+1) = \begin{pmatrix} x_{i1}(t+1) \\ \dots \\ x_{i7}(t+1) \end{pmatrix}; A_{i0} = \begin{pmatrix} a_{i10} \\ \dots \\ a_{i70} \end{pmatrix};$

$$A_i = \begin{pmatrix} a_{i11} & \dots & a_{i17} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{i71} & \dots & a_{i77} \end{pmatrix}; V_i(t) = \begin{pmatrix} v_{i1}(t) \\ \dots \\ v_{i7}(t) \end{pmatrix}; B_i = \begin{pmatrix} b_{i11} & \dots & b_{i17} \\ \dots & \dots & \dots \\ b_{i71} & \dots & b_{i77} \end{pmatrix};$$

$$X_i(t) = \begin{pmatrix} x_{i1}(t) \\ \dots \\ x_{i7}(t) \end{pmatrix}.$$

Проведем параметрическую идентификацию модели (1), т.е. найдем матрицы  $A_{i0}, A_i, B_i$ . Запишем эти матрицы для первого узла дискретной линейной окрестностной модели [5]:

$$A_{10} = \begin{pmatrix} 80,727946 \\ 175,472253 \\ 1,3100586 \\ 2,111787 \\ 2,601599 \\ 5,474473 \\ 0,8723251 \end{pmatrix};$$

$$A_1 = \begin{pmatrix} 0,427806 & 0,00558 & 0,804723 & -8,62553 & 0,29382 & 2,931238 & 2,503330 \\ 0,353398 & 0,10478 & 3,818766 & -3,095916 & 5,33240 & 2,342204 & -12,035782 \\ -0,000463 & 0,000397 & 0,154774 & -0,031422 & -0,040988 & -0,002668 & -0,101407 \\ -0,004743 & 0,00095 & 0,27917 & 0,271257 & 0,092385 & 0,105527 & -0,680878 \\ 0,002868 & 0,002579 & 0,35552 & 0,401221 & 0,28407 & 0,18637 & -1,202738 \\ 0,00164 & 0,0049 & 0,222213 & -0,175092 & -0,100989 & 0,349513 & -0,23166 \\ -0,002575 & 0,000443 & -0,06928 & -0,028566 & -0,019597 & 0,002999 & 0,258032 \end{pmatrix};$$

$$B_1 = \begin{pmatrix} 0,176756 & 0,027561 & -15,154463 & -1,377652 & 0,554581 & 1,818933 & 11,698021 \\ 0,039782 & 0,243884 & -35,522651 & 0,312772 & -6,808509 & -5,295133 & 37,638607 \\ 0,001489 & 0,000129 & 0,297891 & -0,030870 & 0,043498 & -0,00784 & -0,134359 \\ 0,00086 & 0,006804 & -0,040447 & 0,152843 & 0,001544 & -0,101708 & -0,125085 \\ 0,01589 & -0,015248 & 0,50266 & 0,147951 & 0,098957 & -0,323717 & 0,546416 \\ 0,003233 & -0,00414 & -0,905978 & 0,047728 & 0,038752 & 0,122084 & -0,485384 \\ 0,001561 & 0,000885 & -0,267349 & 0,054406 & 0,032737 & -0,097986 & 0,666962 \end{pmatrix}.$$

**Проверка устойчивости по критерию Гурвица.**

Устойчивость – способность системы стремиться из различных начальных состояний к некоторому равновесному состоянию.

Для проверки устойчивости окрестностной модели необходимо проверить устойчивость системы (1) для каждого  $i$ -го узла, где  $i = 1, \dots, 5$ .

Характеристическое уравнение системы (1) определяется по формуле (2):

$$\det[yE - B_i] = 0, \quad (2)$$

где  $E$  – единичная матрица.

Раскрывая определитель (2), получим характеристическое уравнение (3):

$$a_n y^n + a_{n-1} y^{n-1} + \dots + a_1 y^1 + a_0 = 0, \quad (3)$$

где  $n = 7$  – порядок системы,  $a_i$  – коэффициенты характеристического уравнения,  $i = 0, \dots, n$ ,  $y$  – собственные числа матрицы  $B_i$  [22-24].

Условием устойчивости для дискретных динамических систем является (4):

$$|y_i| < 1, \forall i = \overline{1, n}. \quad (4)$$

Условие (4) означает, что переходная составляющая решения системы (1) стремится к нулю при  $k \rightarrow \infty$ .

В данной работе устойчивость дискретной линейной динамической окрестностной модели процесса очистки сточных вод проверяется по критерию Гурвица. Расчеты для проверки устойчивости производятся в математическом пакете Mathcad.

Для проверки дискретных окрестностных моделей на устойчивость по критерию Гурвица необходимо произвести замену переменной  $y$  в характеристическом уравнении на переменную  $w$  путем подстановки (5):

$$y = \frac{1+w}{1-w}, \quad (5)$$

где  $w$  – псевдочастота.

После упрощения уравнений для каждого узла модели составляем матрицы Гурвица, которые заполняются по следующему алгоритму [25]:

- 1) по главной диагонали слева вниз направо выписываются все коэффициенты уравнения с  $a_{n-1}$  до  $a_0$ ;
- 2) от главной диагонали вверх столбцы заполняются коэффициентами с убывающими индексами;
- 3) от главной диагонали вниз столбцы заполняются коэффициентами с возрастающими индексами;
- 4) остальные места определителя заполняются нулями.

Таким образом, матрица Гурвица порядка  $n$  имеет вид:

$$G_n = \begin{bmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ a_n & a_{n-2} & a_{n-4} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & a_{n-1} & a_{n-3} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & a_n & a_{n-2} & a_{n-4} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & a_0 \end{bmatrix}.$$

Выделяя в матрице Гурвица диагональные миноры, получаем вспомогательные определители Гурвица  $\Delta_{n-1}, \Delta_{n-2}$  и т.д.

$$\Delta_{n-1} = |a_{n-1}|; \quad \Delta_{n-2} = \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} \\ a_n & a_{n-2} \end{vmatrix};$$

$$\Delta_{n-3} = \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} \\ a_n & a_{n-2} & a_{n-4} \\ 0 & a_{n-1} & a_{n-3} \end{vmatrix}, \dots$$

Чтобы дискретная система была устойчива, необходимо и достаточно, чтобы все диагональные миноры были положительными.

На рисунке 2 показаны матрица Гурвица  $G1$  и её определитель  $|G1|$  для первого узла дискретной линейной окрестностной модели.

$$G1 = \begin{pmatrix} 18.79342 & 38.56633 & 6.58986 & 0.02934 & 0 & 0 & 0 \\ 3.77978 & 37.49456 & 21.85829 & 0.88842 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 18.79342 & 38.56633 & 6.58986 & 0.02934 & 0 & 0 \\ 0 & 3.77978 & 37.49456 & 21.85829 & 0.88842 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 18.79342 & 38.56633 & 6.58986 & 0.02934 & 0 \\ 0 & 0 & 3.77978 & 37.49456 & 21.85829 & 0.88842 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 18.79342 & 38.56633 & 6.58986 & 0.02934 \end{pmatrix} \quad |G1| = 1.906 \times 10^4$$

Рисунок 2 – Матрица Гурвица и её определитель для первого узла дискретной линейной окрестностной модели

Найдем остальные диагональные миноры. Например, первый диагональный минор  $|G11| = 18.79342$ . На рисунках 3 – 4 приведены диагональные миноры  $|G12|, |G13|$  для первого узла дискретной линейной окрестностной модели.

$$G12 = \begin{pmatrix} 18.79342 & 38.56633 \\ 3.77978 & 37.49456 \end{pmatrix} \quad |G12| \rightarrow 558.8787709878$$

Рисунок 3 – Второй диагональный минор Гурвица для первого узла дискретной линейной окрестностной модели

$$G13 = \begin{pmatrix} 18.79342 & 38.56633 & 6.58986 \\ 3.77978 & 37.49456 & 21.85829 \\ 0 & 18.79342 & 38.56633 \end{pmatrix} \quad |G13| \rightarrow 14301.826723021630954$$

Рисунок 4 – Третий диагональный минор Гурвица для первого узла дискретной линейной окрестностной модели

Остальные диагональные миноры соответственно равны:

$$|G14| = 193404.5207; |G15| = 856130.882253; |G16| = 649625.0782.$$

Видим, что все диагональные миноры матрицы Гурвица для первого узла дискретной линейной окрестностной модели положительные. Для остальных узлов модели диагональные миноры матрицы Гурвица находятся аналогично и также являются положительными. Следовательно, данная дискретная

линейная окрестностная модель является устойчивой по критерию Гурвица.

Таким образом, в работе рассмотрены окрестностные модели процесса очистки сточных вод. Предложен алгоритм и проведена проверка устойчивости линейных динамических окрестностных моделей по критерию Гурвица. В дальнейшем планируется разработка алгоритмов проверки устойчивости с помощью других критериев для линейных и нелинейных динамических окрестностных моделей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Шмырин А.М. Параметрическая идентификация билинейной окрестностной модели расчета температуры смотки полосы на стане / А.М. Шмырин, И.А. Седых, В.В. Кавыгин, В.М. Тюрин, В.Б. Васильев, С.С. Роечко. – Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2013. – Т. 18, Вып. 1. – С. 77–81.
2. Шмырин А.М. Классификация билинейных окрестностных моделей / А.М. Шмырин, И.А. Седых. – Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. – 2012. – Т. 17, Вып. 5. – С. 1366–1369.
3. Роечко С.С. Матрица структуры билинейной окрестностной системы / С.С. Роечко. – Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. – 2013. – Т. 18, Вып. 5. – С. 2661–2662.
4. Седых И.А. Параметрическая идентификация линейной динамической окрестностной модели / И.А. Седых. – Сборник статей Международной научно-практической конференции «Инновационная наука: прошлое, настоящее, будущее». Уфа: АЭТЕРНА, 2016. – С. 12–19.
5. Седых И.А. Параметрическая идентификация окрестностной модели с помощью генетического алгоритма и псевдообращения модели / И.А. Седых, А.М. Сметанникова. – Интерактивная наука, 2017. – Т. 4, Вып. 14. – С. 113–116.
6. Седых И.А. Идентификация и управление динамическими окрестностными моделями / И.А. Седых. – Современные сложные системы управления (HTCS'2017): материалы XII международной научно-практической конференции, 25-27 октября 2017 г. В 2 ч. Ч. 1. – Изд-во ЛГТУ, 2017. – С. 138–142.
7. Седых И.А. Окрестностные производственные сети / И.А. Седых. – XVII Международные научные чтения (памяти Зворыкина В.К.): Сборник статей Международной научно-практической конференции (1 ноября 2017 г., г. Москва). – Москва: ЕФИР, 2017. – С. 16–19.
8. Седых И.А. Окрестностное моделирование предела текучести стали после непрерывного отжига / И.А. Седых. – Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн: Материалы IV Международной научно-практической конференции (15-17 ноября 2017 г.). В 3 т. Т. 1. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2017. – С. 378–383.
9. Седых И.А. Представление цементного производства иерархическими раскрашенными временными сетями Петри на основе окрестностных моделей / И.А. Седых, Е.С. Аникеев. – Вестник Липецкого государственного технического университета. №1 (31), 2017. – С. 19–24.
10. Седых И.А. Математическое моделирование максимальной концентрации выбросов при производстве клинкера / И.А. Седых, А.М. Шмырин. – В. И. Вернадский: устойчивое развитие регионов. Материалы Международной научно-практической конференции. В 5 т. Т. 4–Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2016. – С. 127–131.
11. Седых И.А. Параметрическая идентификация дискретных динамических систем с временным лагом / И.А. Седых, Е.В. Соловьева. – Вестник Липецкого государственного технического университета. №3 (33), 2017. – С. 26–30.
12. Шмырин А.М. Дискретные модели в классе окрестностных систем / А.М. Шмырин, И.А. Седых. – Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. – 2012. – Т. 17, Вып. 3. – С. 867–871.
13. Адельшин А.В. Анализ и решение задач дискретной оптимизации с логическими ограничениями на основе L-разбиения / А.В. Адельшин, А.А. Колоколов. – Прикладная дискретная математика. № 4 (30), 2015. – С. 100–108.
14. Горбунова Е.В. Дискретные модели анализа наступления событий: разработка подходов к совмещению данных, имеющих разную периодичность / Е.В. Горбунова, В.В. Ульянов. – Социология: 4М. № 43, 2016. – С. 128–153.
15. Ярцев А.Г. Исследование окрестностной модели объекта с учетом ограничений на коэффициенты и параметры / А.Г. Ярцев, А.М. Шмырин. – Материалы XII международной научно-практической конференции «Современные сложные системы управления». – Липецк, 2017. – С. 199–202.
16. Седых И.А. Окрестностное моделирование мультиагентных систем / И.А. Седых. – Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2013. – Т. 18, Вып. 5-2. – С. 2667–2668.
17. А.М. Шмырин Коррекция линейной окрестностной модели с учетом новых данных / А.М. Шмырин, Н.М. Мишачев, Е.П. Трофимов. – Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. – 2015. – Т. 20, Вып. 5. – С. 1544–1546.
18. Зайнуллин Р.Р. Проблемы очистки городских сточных вод / Р.Р. Зайнуллин, А.А. Галяутдинов. – Инновационная наука, 2016. – С. 68–69.
19. Калимуллина Д.Д. Потребности в водоснабжении и водоотведении на тепловых электрических станциях / Д.Д. Калимуллина, А.М. Гафуров. – Инновационная наука, 2016. – С. 98–100.
20. Кулишов С.А. Инновационные подходы к очистке сточных вод от соединений азота в локальных очистных сооружениях / С.А. Кулишов, И.Н. Лыков. – Молодой ученый. – 2016. – № 14 (118). – С. 263–267.
21. Шмырин А.М. Окрестностное моделирование процесса очистки сточных вод / А.М. Шмырин,

И.А. Седых, А.М. Сметанникова, Е.Ю. Никифорова. – Вестник ТГУ. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2017. – Т. 22. Вып. 3. – С. 596–604.

22. Седых И.А. Решение СЛАУ с помощью генетического алгоритма. Тенденции развития современной науки. Сборник тезисов докладов научной конференции студентов и аспирантов ЛГТУ. Часть 2 / И.А. Седых, А.М. Сметанникова. – Липецк, 2017. – С. 233–236.

23. Седых И.А. Проверка устойчивости линейных динамических окрестностных моделей процесса очистки сточных вод / И.А. Седых, А.М. Сметанникова // Материалы областного профильного семинара «Школа молодых ученых» по проблемам технических наук 17 ноября 2017 г. – Липецк, 2017. – С. 125–129.

24. Елькин А.В. Методологические основы исследования устойчивости трубопроводных систем / А.В. Елькин, А.А. Прохоров // Молодой ученый. – 2014. – № 9 (68). – С. 139–145.

25. Антонюк О.А. Применение математической модели Гурвица для определения устойчивости банковской системы / О.А. Антонюк. – Вектор науки ТГУ. №2 (20), 2012. – С. 202–206.

***Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №16-07-00-854 а).***

*Статья поступила в редакцию 16.01.2018*

*Статья принята к публикации 14.03.2018*