



НИЯУ МИФИ - 80 лет




ВНИИА  
РОСАТОМ

# Сборник трудов

Научно-практической конференции

« **Физико-технические  
интеллектуальные системы  
(ФТИС-2022)** »

Москва  
  
Буки Вега  
2022



Сборник трудов  
Научно-практической конференции  
« Физико-технические  
интеллектуальные системы  
(ФТИС-2022) »

Москва  
  
Буки Вегу  
2022

УДК 004.89[53+681.518.3+621]

ББК 32.973

С23

С23 Сборник трудов Научно-практической конференции «Физико-технические интеллектуальные системы» (ФТИС-2022). – М.: Буки Веди, 2022. – 306 стр.

ISBN 978-5-4465-3621-4

Сборник трудов Научно-практической конференции «Физико-технические интеллектуальные системы» (ФТИС–2022) содержит доклады, представленные на ФТИС–2022, которая состоялась в НИЯУ МИФИ (г. Москва) 8–10 февраля 2022 года. Организаторами конференции выступили НИЯУ МИФИ и ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова».

В рамках НПК ФТИС-2022 работали две секции: «Информационно-измерительные и управляющие системы» и «Киберфизическое, электрофизическое и ядерное приборостроение».

В сборнике трудов конференции публикуются доклады по широкой тематике НИОКР: от разработок физических принципов создания ядерно-физической аппаратуры, моделирования ядерных и физических процессов до конструирования встроенных интеллектуальных систем и систем обработки данных и исполнительных систем. Также рассматривается применение интеллектуальных систем в космических экспериментах, ядерной медицине, геофизике, исследования в фундаментальной науке, энергетике, экологическом мониторинге, радиационной безопасности, автоматизации технологических процессов и др.

Сборник предназначен для широкого круга специалистов в области интеллектуальных систем, ядерно-физических технологий, для разработчиков, конструкторов и эксплуатационников интеллектуальных и управляющих систем, а также для студентов старших курсов и аспирантов, обучающихся по указанным направлениям.

Издаётся в авторской редакции.

УДК 004.89[53+681.518.3+621]

ББК 32.973

ISBN 978-5-4465-3621-4

© НИЯУ МИФИ, 2022

© ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова», 2022

© Коллектив авторов, 2022

## Оглавление

<b>Введение</b> .....	10
О конференции .....	11
Цели конференции.....	11
Секции конференции .....	11
Участники конференции.....	11
Программный комитет конференции.....	12
Организационный комитет конференции .....	13
Пленарное заседание .....	14
Секция «Информационно-измерительные и управляющие системы».....	18
Секция «Киберфизическое, электрофизическое и ядерное приборостроение».....	19
Итоги конференции .....	21
<b>Пленарное заседание</b> .....	22
Роль и место НПК ФТИС-2022 в модели дуального образования при подготовке специалистов в ИФТИС НИЯУ МИФИ д.т.н., проф. <b>Ю.Н. Бармаков</b> .....	23
История создания, эволюция и развитие программно-технической платформы ТПТС д.т.н., проф. Ю.Н. Бармаков, д.т.н. <b>В.Л. Кишкин</b> , к.т.н. А.Д. Наризц .....	28
Ядерное приборостроение – направления развития на период до 2030 года д.т.н. <b>С.Б. Чебышов</b> , к.т.н. Д.Ю. Белкин, д.т.н. И.И. Черкашин, А.С. Гордеев .....	31



<b>Секция «Информационно-измерительные и управляющие системы»</b> .....	<b>35</b>
Модель узла детектирования для цифровых двойников каналов контроля нейтронного потока <b>И.В. Аляев</b> , к.т.н. А.О. Толоконский, И.Г. Кулло .....	<b>36</b>
Тензомодуль датчика давления со встроенным датчиком температуры и защитой от механических перегрузок <b>М.В. Басов</b> .....	<b>40</b>
Интеллектуальный анализ архивных данных с целью выявления правил подавления незначимых сигналов тревоги на СВУ АЭС <b>С.Л. Богомолов</b> , д.т.н. А.Н. Анохин .....	<b>46</b>
Разработка системы управления тиристорными агрегатами кипящего стенда <b>П.С. Бондарь</b> , к.т.н. А.О. Толоконский .....	<b>51</b>
Информационно-аналитическая система верификации технической документации оборудования ТПТС: функция автоматизированного отслеживания и внесения изменений и функция верификации проектных данных <b>Л.Ю. Бунатян</b> .....	<b>56</b>
Алгоритмы уменьшения количества точек, необходимых для визуального представления трендов исторических данных в СВУ АСУ ТП АЭС <b>Д.А. Гаркавченко</b> , И.В. Захарин, А.М. Куликов, к.т.н. А.О. Толоконский.....	<b>60</b>
Интеллектуализация управления роботом при сверлении <b>И.Д. Горбенко</b> , к.т.н. О.Б. Шагниева .....	<b>65</b>
Транспондерная система дистанционного мониторинга защитного контейнера с ядерными материалами к.т.н. А.А. Бадыеев, <b>С.П. Дорохов</b> , д.т.н. В.А. Козлов, д.т.н. М.П. Кужель, Е.П. Пономарева, А.С. Салов.....	<b>69</b>
Направления совершенствования систем физической защиты транспортируемых специальных грузов <b>Д.И. Егоров</b> , д.т.н. А.В. Измайлов .....	<b>73</b>
Концепция перехода к машинопонимаемому формату документов по стандартизации и интеграции фонда нормативных документов с автоматизированными информационными системами <b>Т.К. Ерофеева</b> , С.Е. Сбитнев, к.т.н. О.В. Ульянин .....	<b>77</b>

Основные источники отказов программно-аппаратных комплексов и подходы к их предупреждению <b>А.А. Звонарева</b> , к.т.н. А.О. Толоконский.....	81
Интегральные критерии качества в цифровых системах управления, построенных на базе ПТК <b>А.А. Иванова</b> , к.т.н. А.О. Толоконский.....	85
Комплексы технических средств физической защиты ядерных объектов. Опыт целевой подготовки специалистов д.т.н. <b>А.В. Измайлов</b> .....	89
Стендовая отработка инерциально-спутниковых систем навигации и автоматического управления <b>В.В. Ильиных</b> , М.С. Чертков, С.В. Андреев, к.т.н. А.В. Ключников.....	93
Применение симулятора для отладки алгоритмов группового управления коллаборативными подводными роботами <b>Я.М. Каменев</b> .....	97
Сравнительный анализ алгоритмов интеллектуального анализа данных для обработки неструктурированных данных д.т.н. Е.М. Абакумов, А.В. Горлов, <b>М.Д. Кириллова</b> , к.т.н. О.В. Ульянин .....	101
Автоматизация учёта объектов интеллектуальной собственности в рамках развития системы управления знаниями научно-исследовательской организации <b>Н.В. Кирсанов</b> , к.т.н. О.В. Ульянин, д.т.н. Е.М. Абакумов.....	107
Применение технологий виртуальной и дополненной реальности в образовательном процессе к.т.н. А.О. Толоконский, <b>Д.Г. Ковалёнок</b> .....	110
Система автоматического позиционирования световода диагностики «Активная спектроскопия» <b>А.В. Кудрявцев</b> , С.Н. Груздев, Ю.А. Парышкин, А.Б. Рахматулин.....	114
Система сбора и обработка данных вихретокового контроля с использованием сигнальных процессоров <b>А.И. Максимкин</b> , Е.Г. Белендрясова, к.т.н. Б.Ф. Ануфриев, к.соц.н. А.В. Берестов.....	119
Интеллектуальные методы обработки данных при многопараметрическом вихретоковом контроле оболочек твэл из аустенитной стали <b>А.И. Максимкин</b> , Е.Г. Белендрясова, М.В. Тюриков, А.А. Федяков .....	122
Программное обеспечение для валидации характеристик систем управления И.Ю. Лепехин, П.А. Голубев, <b>А.Н. Малышев</b> .....	126

Проектирование системы сбора и обработки данных нейтронной диагностики ДМНП В.А. Федоров, Н.А. Селяев, <b>Е.С. Мартазов</b> , Ю.А. Парышкин, к.ф.-м.н. Ю.А. Кащук, В.А. Воробьев.....	130
Информационно-измерительная система контроля толщины внутреннего слоя биметаллических циркониевых труб А.Н. Аблеев, <b>С.П. Мартыненко</b> , С.С. Мартыненко, Ю.О. Жуковский.....	134
Информационно-измерительная система контроля формоизменения ТВС реакторов ВВЭР-1000 в условиях пристанционных бассейнов выдержки А.Н. Аблеев, <b>С.П. Мартыненко</b> , С.С. Мартыненко .....	139
Информационно-измерительная система контроля давления гелия в твэлах реакторов ВВЭР в условиях производства А.Н. Аблеев, <b>С.П. Мартыненко</b> , С.С. Мартыненко .....	143
Опыт проектирования и разработки автоматизированной системы управления технологической системой ИТЭР <b>А.Ю. Миронов</b> , Н.В. Нагорный, А.А. Звонарева, М.К. Журавлёв, Д.И. Гужев, А.И. Николаев, к.т.н. А.О. Толоконский .....	147
Возможности искусственного интеллекта для обеспечения безопасности ядерно опасных объектов и контроля технологических процессов <b>А.А. Мьякин</b> .....	151
Опыт применения современных аппаратных и программных средств для потоковой обработки научных данных физических установок <b>Н.В. Нагорный</b> , А.А. Звонарева, А.Ю. Миронов, Е.Ю. Миронова, М.К. Журавлёв, Д.И. Гужев, А.И. Николаев, к.т.н. А.О. Толоконский.....	155
Применение методов компьютерного зрения и машинного обучения для обнаружения граф в электронной конструкторской документации <b>П.С. Ножнов</b> , к.т.н. О.В. Ульянин, д.т.н. Е.М. Абакумов .....	159
Система управления нагрева и охлаждения при проведении термической обработки дисков газотурбинных двигателей <b>П.Б. Римша</b> , к.т.н. А.О. Толоконский .....	164
Диагностика и отказоустойчивость бортовых вычислителей к.т.н. <b>Н.В. Сильянов</b> .....	169
Разработка сервисного протокола RMAP-2.0 для процессорных модулей ТПТС <b>Ю.Н. Тихонов</b> .....	173

<b>Секция «Киберфизическое, электрофизическое и ядерное приборостроение»</b> .....	177
Элементный анализ фосфорных руд методом меченых нейтронов к.ф.-м.н. В.Ю. Алексахин, <b>А.И. Ахунова</b> , Е.А. Разинков, Ю.Н. Рогов, д.ф.-м.н. М.Г. Сапожников.....	178
Изменение структурно-фазового состояния поверхностного слоя хромистой стали под действием потоков плазмы к.ф.-м.н. <b>Н.В. Бойко</b> , к.ф.-м.н. С.В. Колесников, С.Г. Рудаков, д.т.н. Б.Д. Лемешко, к.т.н. Ю.В. Михайлов, И.А. Прокуратов .....	182
Электрофизическое оборудование для исследований вакуумных свойств электровакуумных материалов и контроля герметичности газонаполненных приборов к.т.н. <b>С.А. Бушин</b> , к.т.н. С.Г. Давыдов, к.т.н. В.О. Ревазов, к.т.н. Р.Х. Якубов.....	187
Влияние конструктивных характеристик импульсной ксеноновой лампы на электрофизические свойства плазмообразующей среды д.т.н. <b>С.В. Гавриш</b> , С.Г. Киреев, к.т.н. Д.Н. Кугушев, Д.Ю. Пугачев, к.т.н. С.В. Пучнина ...	191
Экспериментальное исследование электродных систем ионизационных камер деления для ядерных реакторов с натриевым теплоносителем <b>Я.В. Глазюк</b> , к.т.н. В.П. Алферов, Б.С. Саламаха, М.Л. Житченко, К.С. Трофимов .....	195
Особенности построения измерительных каналов радиационного мониторинга АЭС большой мощности с учетом проектных требований объектов контроля Е.М. Ветошкин, <b>А.С. Гордеев</b> , А.А. Иванов, А.В. Калинин, Р.А. Насибуллин, д.т.н. С.Б. Чебышов, И.И. Черкашин.....	199
Комплекс для исследования процессов в области физики разряда и его применение к.т.н. <b>С.Г. Давыдов</b> , д.ф.-м.н. А.Н. Долгов, А.А. Козлов, к.т.н. В.О. Ревазов, к.т.н. Р.Х. Якубов.....	203
Применение сцинтиллятора ZnS+LiF для построения детекторов тепловых нейтронов к.ф.-м.н. С.В. Колесников, к.ф.-м.н. Е.В. Рябева, к.ф.-м.н. Н.В. Бойко, <b>А.П. Денисенко</b> , С.Г. Рудаков, А.Н. Шарифбаев, И.С. Левцов .....	208
Развитие методов математического моделирования при разработке изделий ядерного приборостроения – актуальные задачи и особенности применения <b>М.Д. Дерябина</b> , А.А. Королёв, Р.М. Лёвин, С.В. Ткачёв, д.т.н. С.Б. Чебышов, И.И. Черкашин.....	213

Особенности разработки технологических спектрометров для измерения объёмной активности ИРГ и жидких сред с применением сцинтилляционных детекторов <b>М.Д. Дерябина</b> , М.Л. Гаврилюк, А.А. Иванов, И.В. Петрова, А.А. Королёв, Н.Е. Плахин .....	217
Проблемные вопросы метрологии ионизирующих излучений д.т.н. С.Б. Чебышов, <b>А.В. Журавлев</b> , П.И. Солодских.....	221
Характеристики спектрометра быстрых нейтронов на базе детектора с алмазным чувствительным элементом <b>Р.Ф. Ибрагимов</b> , к.ф.-м.н. В.В. Гаганов, И.В. Урупа, И.С. Вершинин, к.ф.-м.н. Е.В. Рябева, Я.А. Кокорев .....	224
Реализация программно-аппаратного обеспечения непрерывного радиационного контроля газоаэрозольных сред <b>В.А. Кишев</b> , А.А. Иванов, Е.М. Ветошкин, д.т.н. С.Б. Чебышов .....	229
Возможность использования наведённой активности в конструкционных материалах стенда анализа горных пород для контроля за стабильностью процесса измерения к.ф.-м.н. <b>С.В. Колесников</b> , к.ф.-м.н. Е.В. Рябева, к.ф.-м.н. Н.В. Бойко, Е.Э. Лупарь, Р.Ф. Ибрагимов, С.Г. Рудаков, О.В. Чакилев .....	233
Чувствительные элементы для детектирования водорода на основе газохромных и газогирохромных материалов <b>Д.П. Куликова</b> , к.ф.-м.н. Е.М. Сгибнев, к.ф.-м.н. Г.М. Янковский, К.Н. Афанасьев, И.В. Быков, д.ф.-м.н. А.В. Барышев.....	237
Вакуумно-технологический комплекс ЛОТОС 2I-VE для формирования перспективных покрытий и пленочных электродных систем к.т.н. С.Г. Давыдов, д.ф.-м.н. А.Н. Долгов, <b>В.А. Максимов</b> , к.т.н. В.О. Ревазов, к.т.н. Р.Х. Якубов.....	242
Исследование режимов работы малогабаритных ионных источников Пеннинга в условиях воздействия внешних магнитных полей д.т.н. <b>С.П. Масленников</b> , И.М. Мамедов .....	246
Влияние собственных магнитных полей электронных пучков на их транспортировку в мощных многолучевых клистронах <b>А.А. Матвеев</b> , д.т.н. С.П. Масленников, И.С. Кузнецов, В.М. Саблин, Д.А. Терентьев ...	250
Результаты исследований и разработок материалов для регистрации нейтронных потоков в широком энергетическом диапазоне <b>И.В. Мосягина</b> , О.В. Ивкина, М.А. Шарипова, д.т.н. С.Б. Чебышов .....	254
Проектирование и реализация программно-аппаратных средств АСКРО в соответствии с актуальными техническими требованиями и задачами мониторинга окружающей среды А.С. Гордеев, <b>Р.А. Насибуллин</b> , д.т.н. С.Б. Чебышов, И.И. Черкашин.....	258

<p>Моделирование взаимодействия электронов и гамма-излучения с материалом блока детектирования в системах мониторинга объёмной активности инертных радиоактивных газов в аварийных режимах АЭС д.т.н. С.Б. Чебышов, к.ф.-м.н. Е.В. Рябева, Е.М. Тюрин, <b>В.О. Небольсин</b>, Р.В. Усков ..... 263</p>	263
<p>Определение углерода в почве методом меченых нейтронов к.ф.-м.н. В.Ю. Алексахин, <b>Е.А. Разинков</b>, Ю.Н. Рогов, д.ф.-м.н. М.Г. Сапожников ..... 267</p>	267
<p>Развитие аппаратуры контроля объёмной активности жидких сред АО «СНИИП» <b>А.В. Редкоус</b>, А.А. Иванов, А.В. Калинин, В.Р. Минниханов, М.К. Савельев, М.Д. Дерябина..... 271</p>	271
<p>Использование метода меченых нейтронов для элементного анализа материалов на конвейере к.ф.-м.н. В.Ю. Алексахин, И.К. Комаров, Е.А. Разинков, <b>Ю.Н. Рогов</b>, д.ф.-м.н. М.Г. Сапожников, И.Е. Чириков-Зорин..... 275</p>	275
<p>Математическая модель оценки вероятности обнаружения источников радиационного излучения при сверхнизких уровнях полезного сигнала <b>Ю.А. Руденко</b>..... 279</p>	279
<p>Анализ численных методов восстановления спектров нейтронов при использовании различных регистрирующих систем: алмазного детектора, пластикового сцинтиллятора и набора активационных детекторов к.ф.-м.н. <b>Е.В. Рябева</b>, А.П. Денисенко, Р.Ф. Ибрагимов, И.В. Урупа..... 283</p>	283
<p>Восстановление энергетических распределений источников нейтронов по показаниям сцинтилляционного спектрометра на основе монокристалла стильбена <b>Д.И. Савин</b>, И.В. Урупа, Е.Э. Лупарь, Р.Ф. Ибрагимов, к.ф.-м.н. Е.В. Рябева ..... 288</p>	288
<p>Исследовательская установка для диагностики физических процессов, протекающих при работе импульсного разрядника с оптическим управлением <b>М.С. Скоробогатых</b>, к.т.н. С.Г. Давыдов, к.т.н. В.О. Ревазов, В.П. Селезнёв, А.И. Ядровский, к.т.н. Р.Х. Якубов ..... 293</p>	293
<p>Результаты разработки технического проекта системы радиационного контроля модернизированного плавучего энергоблока д.т.н. С.Б. Чебышов, <b>С.В. Ткачев</b>..... 297</p>	297
<p>Сравнение и гармонизация отечественных и международных нормативных документов, регламентирующих разработку и внедрение цифровых систем контроля и управления АС И.Д. Ракитин, д.т.н. <b>С.Б. Чебышов</b> ..... 301</p>	301



Введение

## О конференции

08–10 февраля 2022 г. в Москве на базе НИЯУ МИФИ прошла Научно-практическая конференция «Физико-технические интеллектуальные системы» («ФТИС-2022»). Организаторами конференции выступали Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Институт физико-технических интеллектуальных систем (ИФТИС) НИЯУ МИФИ и ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова».

Основные тематические направления конференции: проектирование физико-технических интеллектуальных (киберфизических) устройств и систем, включающих в себя встроенные сенсорные элементы, исполнительные устройства, средства интеллектуальной обработки данных и т.п.; их эксплуатация в прикладной геофизике, автоматизации технологических процессов, робототехнике, космических исследованиях, ядерной медицине, глобальных смарт-системах, экологическом мониторинге и средствах обеспечения радиационной безопасности.

### Цели конференции:

- обмен опытом и знаниями, повышение научно-технического потенциала и профессиональных качеств молодых ученых и инженеров в области функционального схемотехнического, программного, конструкторского и технологического проектирования, а также эксплуатации физико-технических интеллектуальных (киберфизических) устройств и систем;
- создание постоянно действующих научных площадок по наиболее актуальным проблемам в рамках тематики конференции;
- организация процесса передачи знаний и достижений опытными специалистами молодым ученым и инженерам.

### Секции конференции:

- «Информационно-измерительные и управляющие системы» (ИИУС);
- «Киберфизическое, электрофизическое и ядерное приборостроение» (КфЭЯП).

### Участники конференции

В работе конференции приняли участие более 170 сотрудников отраслевых предприятий и научных организаций, молодые ученые, аспиранты и студенты из Москвы, Подмосковья, Сарова, Нижнего Новгорода, Снежинска, Санкт-Петербурга – преимущественно из столичного региона (91 %).





## Программный комитет конференции

### Председатель программного комитета

д.ф.-м.н. **В.И. Шевченко**, ректор НИЯУ МИФИ.

### Заместители председателя программного комитета:

- д.ф.-м.н. **О.В. Нагорнов**, первый проректор НИЯУ МИФИ;
- д.ф.-м.н. **М.Н. Стриханов**, директор ИНТЭЛ НИЯУ МИФИ.

### Члены программного комитета:

- д.т.н. **Е.М. Абакумов**, профессор кафедры прикладной ядерной физики (№24) НИЯУ МИФИ, директор по информационным технологиям ГК «Росатом»;
- **А.Ю. Антонов**, заместитель директора по информационным технологиям и системам управления ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»;
- д.т.н., проф. **Ю.Н. Бармаков**, и.о. директора ИФТИС НИЯУ МИФИ, первый заместитель научного руководителя ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»;
- д.ф.-м.н., член-корр. РАН **С.В. Гарнов**, научный руководитель Института ЛаПлаз НИЯУ МИФИ, директор Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН;
- д.т.н., проф. **А.В. Измайлов**, профессор кафедры автоматики (№2) НИЯУ МИФИ, советник генерального директора АО «ФЦНИВТ «СНПО «Элерон»;
- д.т.н. **В.Л. Кишкин**, заведующий кафедрой автоматики (№2) НИЯУ МИФИ, первый заместитель главного конструктора – начальник научно-производственного комплекса 1 ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»;
- д.ф.-м.н. **И.Г. Митрофанов**, начальник отдела ИКИ РАН;
- **М.Н. Михайлов**, первый заместитель генерального директора АО «НИКИЭТ»;
- д.ф.-м.н., проф. **М.Г. Сапожников**, начальник сектора Лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ;
- к.т.н. **А.В. Сидоров**, заместитель заведующего кафедрой конструирования приборов и установок (№18) НИЯУ МИФИ, доцент кафедры конструирования приборов и установок (№18) НИЯУ МИФИ, первый заместитель директора – главный конструктор ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»;
- д.ф.-м.н., проф., академик РАН **В.П. Смирнов**, научный руководитель АО «НИИТФА», АО «Наука и инновации» ГК «Росатом»;
- к.т.н. **М.М. Степичев**, заместитель генерального директора по развитию и производству АО «НИИТФА»;
- д.т.н. **С.Б. Чебышов**, первый заместитель генерального директора АО «СНИИП» по научной работе;
- к.т.н. **Д.И. Юрков**, заведующий кафедрой прикладной ядерной физики (№24) НИЯУ МИФИ, заместитель директора – первый заместитель главного конструктора – руководитель НПЦ ИТ ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова».

## Организационный комитет конференции

### Председатель организационного комитета

к.ф.-м.н. **Е.В. Рябева**, заместитель директора ИФТИС НИЯУ МИФИ, заместитель заведующего кафедрой прикладной ядерной физики (№24) НИЯУ МИФИ, доцент кафедры прикладной ядерной физики (№24) НИЯУ МИФИ.

### Заместитель председателя организационного комитета

д.т.н. **С.П. Масленников**, профессор кафедры прикладной ядерной физики (№24) НИЯУ МИФИ.

### Члены организационного комитета:

- **П.Б. Бенеш**, главный специалист ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»;
- к.соц.н. **А.В. Берестов**, заместитель директора ИФТИС НИЯУ МИФИ, заместитель заведующего кафедрой конструирования приборов и установок (№18) НИЯУ МИФИ, доцент кафедры конструирования приборов и установок (№18) НИЯУ МИФИ;
- д.т.н. **В.И. Бутин**, профессор кафедры прикладной ядерной физики (№24) НИЯУ МИФИ, начальник научно-исследовательского отделения – начальник научно-исследовательского отдела ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»;
- к.т.н. **А.В. Бутина**, ведущий научный сотрудник ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»;
- **С.Ю. Гриценко**, начальник отделения ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»;
- **М.Ф. Исмагилов**, директор НПО №59 АО «НИИТФА»;
- **В.В. Карушев**, заместитель главного конструктора – начальник научно-конструкторского отделения ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»;
- **И.Г. Кулло**, доцент кафедры автоматике (№2) НИЯУ МИФИ;
- **А.Д. Куропаткин**, советник главного конструктора ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»;
- **Т.Г. Новикова**, начальник рекламного-информационного отдела ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»;
- **С.А. Полихов**, руководитель проектного офиса №4 АО «НИИТФА»;
- **В.А. Федоров**, старший преподаватель кафедры автоматике (№2) НИЯУ МИФИ;
- к.т.н. **А.С. Хапов**, заместитель директора – заместитель главного конструктора – руководитель НПЦ СЭВП ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова».

## Пленарное заседание

Пленарное заседание открыл ректор НИЯУ МИФИ и председатель программного комитета конференции, д.ф.-м.н. **В.И. Шевченко**. Он отметил, что конференция стала первой в ряду крупных научных мероприятий, которые пройдут в год 80-летия университета.

В.И. Шевченко напомнил о важной стороне многолетней связи университета с ядерной отраслью – разработке физико-технических интеллектуальных систем. «Я думаю, что само это название – «физико-технические интеллектуальные системы» – очень удачно объединяет в себе глубокую научную физическую основу и техническое совершенство устройств, инженерную отточенность, когда инженерия переходит грань от ремесла к высокому искусству. И те молодые люди, которых восхищает техническое совершенство этих систем, наши абитуриенты и студенты, смогут в будущем стать сотрудниками ВНИИА им. Н.Л. Духова и других партнерских организаций», – отметил он.

Ректор НИЯУ МИФИ подчеркнул: «Мы гордимся достижениями наших предшественников и чествуем их авторов. Но дух конференции связан, прежде всего, с нерешенными задачами, открытыми проблемами, которые нам предстоит решать в будущем. Именно новые вызовы привлекут мотивированных, способных молодых людей, которые будут приходить в эту интересную область самой передовой инженерии, которую только можно себе представить», – заключил он.

Заместитель заведующего кафедрой конструирования приборов и установок (№18) ИФТИС НИЯУ МИФИ, доцент кафедры №18, первый заместитель директора – главный конструктор ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова», к.т.н. **А.В. Сидоров** подчеркнул актуальность разработанной институтом дуальной модели образования в ИФТИС, учитывающей особенности подготовки специалистов в интересах не только ВНИИА, но и отрасли в целом.

На пленарном заседании конференции было заслушано 12 докладов. Среди главных тематических направлений конференции – проектирование киберфизических устройств и систем, их эксплуатация в прикладной геофизике, автоматизации технологических процессов, робототехнике, космических исследованиях, ядерной медицине, глобальных смарт-системах, экологическом мониторинге и радиационной безопасности.

В своём докладе и.о. директора ИФТИС НИЯУ МИФИ, первый заместитель научного руководителя ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова», д.т.н., проф. **Ю.Н. Бармаков** отметил, что этап очередной технологической революции, в котором мы живем, характеризуется резким усложнением создаваемой продукции за счет интеграции самых разнообразных функций в одном изделии. Это означает, что вся разрабатываемая аппаратура в краткосрочной перспективе будет наделена интеллектуальными свойствами, обеспечивающими возможность самоуправления, самообучения и самодиагностики, образуя класс «киберфизических» или физико-технических интеллектуальных устройств. В настоящее время в стенах вузов не удастся обеспечить получение выпускниками инженерных компетенций, необходимых для самостоятельной работы в сфере проектирования и эксплуатации сложной инновационной аппаратуры. В связи с этим молодые специалисты вынуждены приобретать эти навыки в течение первых 3–4 лет своей работы на предприятии. В рамках дуального практико-ориентированного подхода к образованию ИФТИС МИФИ и ВНИИА разработана и внедрена комплексная научно-образовательная система, направленная на подготовку специалистов, в полной мере владеющих современным инструментарием и способных к самостоятельной творческой работе по созданию инновационных продуктов в новых условиях.

В докладе директора по информационным технологиям Госкорпорации «Росатом», профессора кафедры прикладной ядерной физики (№24) ИФТИС НИЯУ МИФИ, д.т.н. **Е.М. Абакумова**, посвященном лучшим практикам цифровой трансформации от мировых лидеров, были рассмотрены разработанные программы внутренней цифровизации в рамках единой цифровой стратегии Росатома. Программы включают в себя развитие цифрового взаимодействия с государством, ИТ-инфраструктуры, цифровых сервисов и ИТ-развитие стратегических направлений (Северный морской путь, логистика, цифровизация ЖЦ ОИА, Lean Smart Plant).

Совместный доклад научного руководителя ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова», д.ф.-м.н. **А.В. Андрияша** и начальника лаборатории ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова», д.ф.-м.н. **В.В. Погосова** был посвящен текущему состоянию дел и перспективам квантовых вычислений. Были отмечены актуальные практические задачи, стоящие в настоящее время перед ядерно-оружейным и ядерно-энергетическим комплексами Госкорпорации «Росатом», в частности, в области квантовой химии и материаловедения, получения новых материалов с требуемыми свойствами (в т.ч. разработка радиационно стойких материалов корпусов и твэлов, улучшение эксплуатационных свойств материалов и увеличение времени их эксплуатации), разработки лекарств, решения оптимизационных задач (логистика, финансовые и транспортные потоки, ИТ-технологии, работа с big data) и др.

Обзорный доклад директора Института ЛаПлаз НИЯУ МИФИ, д.ф.-м.н., проф. **А.П. Кузнецова** был посвящен практическому применению лазерных технологий в ядерно-физических исследованиях. Одним из ключевых событий 2021 года стало успешное проведение эксперимента National Ignition Facility по термоядерному синтезу, в ходе которого на крупнейшей в мире лазерной установке было высвобождено 1,3 МДж энергии, приблизив эксперимент к точке безубыточности. Это примерно 70% энергии, которую лазер потратил на зажигание, и почти в восемь раз больше, чем в ходе аналогичного предшествующего эксперимента. Такой результат считают прорывом в термоядерном синтезе, вплотную приближающим человечество к воспроизведению в земных условиях процессов, происходящих на Солнце, и обеспечению человечества безграничной чистой энергией на тысячелетия вперед. Также в докладе был отмечен колоссальный скачок, произошедший за последние 10 лет в области использования лазерной техники: в настоящее время достигнуты уровни давлений (по сравнению с подземными ядерными экспериментами 1980-х годов), при которых вещество может быть сжато до тех параметров, при которых происходит термоядерное горение.

Научный руководитель АО «НИИТФА», д.ф.-м.н., проф., академик РАН **В.П. Смирнов** посвятил свой доклад ядерной медицине – одному из 11 приоритетных направлений научного и технологического развития Госкорпорации «Росатом». Данное направление представляет собой новый инвестиционно привлекательный бизнес Госкорпорации, т.к. обладает существенным потенциалом для решения задач здравоохранения в России. В докладе были рассмотрены возможности современной лучевой терапии и диагностических комплексов; в основе подобных установок – физические приборы с использованием ионизирующих излучений (например, компактные источники быстрых нейтронов, разрабатываемые во ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»), а также система позиционирования источника излучения (АО «НИИТФА») и система позиционирования пациента (МОКБ «Марс» – филиал ФГУП «ВНИИА»). Несмотря на высокий уровень развития медицинских приборов, остается значительным поле для усовершенствований и поиска новых технологий воздействия, исследования фундаментальных вопросов взаимодействия излучений с тканями, создания новых приборов.

В докладе первого заместителя директора АО «СНИИП», д.т.н. **С.Б. Чебышова** был показан достигнутый уровень изделий ядерного приборостроения гражданского назначения. Были рассмотрены основные виды радиометрической, спектрометрической и дозиметрической аппаратуры, приведен анализ соответствия технического уровня поставляемых приборов на ОИАЭ с требованиями основных потребителей – АС, предприятия АО «ТВЭЛ», ЦЯНТ и др. Изложены основные направления развития ядерного приборостроения, включая детекторы ионизирующего излучения, ядерную электронику, методы обработки и представления информации, применение методов моделирования и др. Было отмечено, что, согласно разработанной стратегии организационного развития ядерного приборостроения до 2030 г., рост отрасли будет создаваться за счет крупных отраслевых проектов (развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии; Mega Science проекты). При этом одним из ключевых элементов стратегии станет разработка и реализация концепции ядерных измерительно-информационных технологий.

Заведующий кафедрой автоматики (№2) ИФТИС НИЯУ МИФИ, первый заместитель главного конструктора ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова», д.т.н. **В.Л. Кишкин** в своем докладе коснулся истории создания, развития и применения программно-технической платформы ТПТС разработки ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова» на АЭС и других энергетических объектах. Были рассмотрены особенности и преимущества платформы, а также обозначены перспективы развития и применения. Применение и успешная эксплуатация ТПТС ВНИИА на 15 энергоблоках АЭС, более чем на 40 объектах тепловой энергетики, а также на объектах атомной и нефтяной промышленности подтверждает высокий научно-технический уровень, высокое качество и конкурентоспособность этой платформы. Особо подчеркивается, что постоянное совершенствование и развитие ТПТС обуславливает дальнейшее широкое применение платформы ТПТС для автоматизации АЭС и других энергетических и промышленных объектов.

Доклад заведующего кафедрой прикладной ядерной физики (№24) ИФТИС НИЯУ МИФИ, заместителя директора – первого заместителя главного конструктора – руководителя НПЦ ИТ ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова», к.т.н. **Д.И. Юркова** был посвящен текущему уровню состояния разработки и производства импульсных нейтронных генераторов (ИНГ) гражданского назначения во ВНИИА. Рассмотрены основные виды разрабатываемых в настоящее время ИНГ и ядерно-физической аппаратуры на их основе. Представлены генераторы нового поколения, обладающие высоким нейтронным выходом, новыми системами регистрации излучений, высокой температурной и вибрационной стойкостью. Приведён сравнительный анализ технических параметров ИНГ производства ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова» с соответствующей продукцией организаций-конкурентов. Изложены основные направления развития импульсных нейтронных генераторов, которые включают как новые конструкторские решения, позволяющие расширить области применения ИНГ, так и методическое обеспечение ядерно-физической аппаратуры, что в настоящее время становится неотъемлемой частью такого наукоёмкого и инновационного продукта, каким является импульсный генератор нейтронов.

Доклад научного руководителя ВНИИА по направлению нейтронных генераторов, д.т.н. **Е.П. Боголюбова** был посвящен описанию текущего состояния дел в области разработки ИНГ, применяемых при разработке нефтегазовых месторождений для геофизических исследований нефтегазовых скважин и создания современных комплексов их бурения. Были рассмотрены проблемные вопросы выбора пути развития аппаратуры ИНК, создания новых видов оборудования, миниатюризации составных частей аппаратуры, а также совершенствования средств обработки геофизической информации, получаемой в процессе каротажа.



Начальник сектора Лаборатории физики высоких энергий Объединённого института ядерных исследований, д.ф.-м.н., проф. **М.Г. Сапожников** в рамках доклада «Элементный анализ с применением метода меченых нейтронов» рассказал об инновационном методе, разработанном в ОИЯИ, который позволяет определять элементный состав вещества в реальном времени без отбора пробы и за счёт пространственной и временной селекции событий существенно снизить уровень регистрируемого фонового излучения. В основе работы таких анализаторов – уникальный по своим характеристикам нейтронный генератор ИНГ-27, созданный во ВНИИА. Аппаратура, использующая метод меченых нейтронов, применяется как в космических исследованиях, так и в горнодобывающей промышленности. К настоящему времени произведено более 200 генераторов ИНГ-27 с альфа-детекторами различных типов, которые используют в организациях, занимающихся научными исследованиями и прикладными задачами в области нейтронного активационного анализа.

Доклад начальника отдела Института космических исследований РАН, д.ф.-м.н. **И.Г. Митрофанова** был посвящен российскому ядерно-физическому эксперименту ДАН («Динамическое альbedo нейтронов») на борту марсохода NASA Curiosity. В докладе представлено описание аппаратуры ДАН и приведены основные результаты измерений на поверхности Марса. Задачей эксперимента является оценка массовой доли грунтовой воды вдоль трассы движения марсохода. В состав ДАН входит два отдельных блока – блок электроники и детекторов ДАН-ДЭ (ИКИ РАН) и блок импульсного нейтронного генератора ДАН-ИНГ (ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»). За время своей работы (12 августа 2012 г. – 8 февраля 2022 г.) марсоход проехал более 20 км, прибором ДАН проведено более 1 000 сеансов активного нейтронного зондирования грунта, а полное время работы ДАН-ИНГ в импульсном режиме составило более 400 ч. В настоящее время эксперимент продолжается. Направления развития линейки приборов ДАН включают в себя приборы для проведения активного зондирования поверхности небесных тел нейтронами и гамма-лучами.

Заведующий лабораторией нейтронной и гамма-спектроскопии Института космических исследований РАН, д.ф.-м.н., проф. РАН **М.Л. Литвак** в своем докладе «Прибор АДРОН для активного нейтронного зондирования состава вещества Луны и Марса с борта посадочных аппаратов» остановился на одной из важнейших задач планетных исследований – определении элементного состава вещества небесных тел при помощи методов ядерной физики. Эту задачу призвана решать научная аппаратура АДРОН – совместная разработка ИКИ РАН и ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова». Аппаратура АДРОН включает блоки импульсного нейтронного генератора, гамма- и нейтронных детекторов и электроники. В докладе были рассмотрены достигнутые уникальные характеристики этой аппаратуры и подробно рассмотрены этапы ее отработки. Применение такой аппаратуры на космических аппаратах Луна-25, Луна-27 и ЭкзоМарс-2022 позволит выполнить поставленные перед этими проектами задачи исследований Луны и Марса.

## Секция «Информационно-измерительные и управляющие системы»

### Общая информация

Представлен 31 доклад, посвященный актуальным проблемам разработки информационно-измерительных и управляющих систем.

Докладчики представляли НИЯУ МИФИ, ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова», АО «ФЦНИВТ «СНПО «Элерон», Частное учреждение Госкорпорации «Росатом» «Проектный центр ИТЭР», АО «РАСУ», ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова» и другие организации.

В работе секции приняли участие более 70 сотрудников отраслевых предприятий и научных организаций, молодые ученые, аспиранты и студенты из Москвы, Сарова, Нижнего Новгорода, Снежинска, Санкт-Петербурга.

### Основные тематические направления

Применение методов искусственного интеллекта в обработке документации и архивных данных (6 докладов). Вопросы совершенствования систем физической защиты ядерных материалов и объектов (4 доклада). Результаты работ по созданию технологических систем и диагностик для экспериментальной термоядерной установки ИТЭР (4 доклада). Методы и средства обработки данных информационно-измерительных систем для контроля параметров компонентов тепловыделяющих элементов и сборок реакторов ВВЭР и БН (6 докладов). Решение практических задач по моделированию и разработке аппаратно-программных средств систем контроля и управления для различных промышленных объектов (7 докладов). Вопросы диагностики, моделирования и тестирования систем управления и их компонентов (3 доклада). Участники секции обсудили также вопросы целевой подготовки специалистов.

### Программа заседаний

С приветственным словом к участникам заседаний секции обратился заведующий кафедрой «Автоматика», д.т.н. **В.Л. Кишкин**, отметивший большой интерес научной общественности к секциям конференции, а также разнообразие тем представленных докладов.

ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова» совместно с НИЯУ МИФИ представило серию докладов, посвященных применению методов искусственного интеллекта в обработке документации. В докладах АО «ФЦНИВТ «СНПО «Элерон» и ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» были рассмотрены вопросы совершенствования систем физической защиты ядерных материалов и объектов. Докладчиками из НИЯУ МИФИ и Проектного центра ИТЭР были представлены результаты работ по разработке технологических систем и диагностик для экспериментальной термоядерной установки ИТЭР.

В рамках программы секции на основе экспертной оценки выступлений был проведен конкурс представленных докладов, по результатам которого было принято решение о награждении победителей конкурса с вручением им дипломов 1 и 2 степени.

### *Дипломами 1 степени были награждены:*

1. Т.К. Ерофеева (НИЯУ МИФИ, ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова») за доклад «Концепция перехода к машинопонимаемому формату документов по стандартизации и интеграции фонда нормативных документов с автоматизированными информационными системами»;
2. Е.С. Мартазов (НИЯУ МИФИ) за доклад «Проектирование системы сбора и обработки данных нейтронной диагностики ДМНП».

### ***Дипломами 2 степени были награждены:***

1. Д.И. Егоров (АО «ФЦНИВТ «СНПО «Элерон») за доклад «Направления совершенствования систем физической защиты транспортируемых специальных грузов»;
2. С.П. Дорохов (Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седякина») за доклад «Транспондерная система дистанционного мониторинга защитного контейнера с ядерными материалами»;
3. С.П. Мартыненко (НИЯУ МИФИ) за серию докладов «Информационно-измерительная система контроля толщины внутреннего слоя биметаллических циркониевых труб», «Информационно-измерительная система контроля формоизменения ТВС реакторов ВВЭР-1000 в условиях пристанционных бассейнов выдержки», «Информационно-измерительная система контроля давления гелия в твэлах реакторов ВВЭР в условиях производства».

## **Секция «Киберфизическое, электрофизическое и ядерное приборостроение»**

Научная тематика секции «Киберфизическое, электрофизическое и ядерное приборостроение» охватывает широкий круг вопросов, связанных с современными исследованиями и практическими достижениями в области ядерной физики, электрофизики, геофизики, физики плазмы, мощной импульсной электроники, СВЧ-электроники.

### **Общая информация**

Представлено 30 устных докладов.

Организации-участники: НИЯУ МИФИ, ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова», АО «СНИИП», ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», ОИЯИ, МГУ им. М.В. Ломоносова, ИТПЭ РАН, ООО «Диамант», ООО «НПО «Мелитта», АО НПП «Торий».

В работе секции приняли участие более 70 сотрудников отраслевых предприятий и научных организаций, молодые ученые, аспиранты и студенты.

### **Основные тематические направления**

Системы радиационной безопасности и дозиметрического контроля, аппаратура для детектирования, регистрации и измерения параметров ионизирующих излучений, нейтронных потоков, излучений оптического диапазона; метрологическое обеспечение ядерно-физической аппаратуры (18 докладов).

Электрофизические установки для генерации потоков нейтронов и заряженных частиц, ионизирующих излучений, излучений оптического и СВЧ-диапазонов, аппаратура для исследований в области физики вакуумного и газового разряда (12 докладов).

### **Программа заседаний**

Программа заседаний секции составлена с учетом тематики докладов, что позволило объединить специалистов, работающих в смежных областях научных исследований, и создало условия для активного обсуждения представленных материалов и налаживания контактов для дальнейшего сотрудничества между научными коллективами.

С приветственным словом к участникам заседаний секции обратился заведующий кафедрой «Прикладная ядерная физика», к.т.н. **Д.И. Юрков**, отметивший важность установления прямых контактов и налаживания сотрудничества между предприятиями отрасли, ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова» и НИЯУ МИФИ и пожелавший плодотворной работы участникам конференции.



ООО «Диамант» совместно с ОИЯИ представило серию докладов о разработке интеллектуальных физико-технических систем на основе метода меченых нейтронов, в том числе новые перспективные разработки по определению углерода в почве.

В докладах АО «СНИИП» поставлены вопросы необходимости метрологического обеспечения, в особенности – в области источников промежуточных нейтронов, их сертификации и измерения их спектров.

От ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова» была представлена серия докладов по тематике исследований в области вакуумного и газового разряда, разработкам высоковольтных, сильноточных систем коммутации для мощных электрофизических установок.

В рамках программы секции на основе экспертной оценки выступлений был проведен конкурс представленных докладов, по результатам которого было принято решение о награждении победителей конкурса с вручением им дипломов 1 и 2 степени.

***Дипломами 1 степени были награждены:***

1. М.Д. Дерябина (АО «СНИИП») за доклад «Развитие методов математического моделирования при разработке изделий ядерного приборостроения – актуальные задачи и особенности применения»;

2. Д.И. Савин (НИЯУ МИФИ) за доклад «Восстановление энергетических распределений источников нейтронов по показаниям сцинтилляционного спектрометра на основе монокристалла стильбена».

***Дипломами 2 степени были награждены:***

1. к.т.н. С.Г. Давыдов (ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова») за доклад «Комплекс для исследования процессов в области физики разряда и его применение»;

2. И.В. Мосягина (АО «СНИИП») за доклад «Результаты исследований и разработок материалов для регистрации нейтронных потоков в широком энергетическом диапазоне»;

3. Е.А. Разинков (ООО «Диамант») за доклад «Определение углерода в почве методом меченых нейтронов».

## Итоги конференции

В ходе заключительного обсуждения результатов работы конференции участники отметили важность открытого обсуждения научных проблем, стоящих перед предприятиями отрасли, благодаря которому молодые сотрудники, аспиранты и студенты имеют возможность перенимать опыт ведущих специалистов и ученых, что способствует их профессиональному росту.

По результатам конференции ИФТИС НИЯУ МИФИ совместно с участниками конференции (ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова», АО «СНИИП») было принято решение провести серию научных семинаров:

- по методам и программным продуктам для проектирования и математического моделирования киберфизических и ядерных систем;
- по вопросам метрологического обеспечения работы с ионизирующим излучением;
- по исследованиям в области вакуумного и газового разряда.

Надеемся, что Научно-практическая конференция ФТИС станет ежегодной площадкой, где молодые ученые смогут не только послушать ведущих специалистов и установить полезные контакты, но и представить профессиональному сообществу свой научно обоснованный подход к решению практических задач.

Материалы конференции представляют несомненный интерес для участников и будут использованы в практической деятельности.

Надеемся на дальнейшее плодотворное сотрудничество и реализацию совместных проектов.

**Оргкомитет НПК «ФТИС-2022»**



## Пленарное заседание

Председатель программного комитета  
**Шевченко Владимир Игоревич**,  
доктор физико-математических наук,  
ректор НИЯУ МИФИ

## **Роль и место НПК ФТИС-2022 в модели дуального образования при подготовке специалистов в ИФТИС НИЯУ МИФИ**

д.т.н., проф. **Ю.Н. Бармаков**

ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова» – Москва, Россия

В докладе представлены причины организации, цели и задачи Научно-практической конференции «Физико-технические интеллектуальные системы» – НПК ФТИС-2022, которую, начиная с 2022 года, планируют проводить совместно ИФТИС НИЯУ МИФИ и ВНИИА им. Н.Л. Духова ежегодно. Рассматриваются особенности и преимущества внедрения дуальной практико-ориентированной модели образования в ИФТИС.

## **Role and Place of the FTIS-2022 Conference in the Model of Dual Education in Specialists Training Process at Institute IFTIS in NRNU MEPhI**

Dr., Prof. **Yu.N. Barmakov**

FSUE Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA) – Moscow, Russia

The paper describes the reasons for organizing, goals and objectives of the Scientific and Practical Conference “Physico-technical Intelligent Systems” (NPK FTIS-2022), which, starting from 2022, is planned to be held annually joint by IFTIS NRNU MEPhI and FSUE VNIIA. It also represents some features and advantages of introducing a dual practice-oriented model of education in IFTIS.

В этом докладе сформулированы причины организации, цели и задачи Научно-практической конференции «Физико-технические интеллектуальные системы» (НПК ФТИС-2022), которую, начиная с 2022 года, планируют проводить совместно ИФТИС НИЯУ МИФИ и ВНИИА им. Н.Л. Духова ежегодно.

Инициатором предложенного формата конференции являлся ВНИИА. Чтобы было понятно, с какой целью – придется начать издалека.

Во второй половине прошлого века начали говорить, что 21-й век будет веком «технологий». И, на мой взгляд, это справедливо. Дело в том, что главным источником прогресса человеческого общества является постоянный рост производительности труда. Энгельс был неточен, когда говорил, что «труд создал человека». Человека и его постоянное развитие создали при- сущие только человеческому виду желание и способность постоянно находить возможности повышения производительности и эффективности своей деятельности в интересах как сокращения затрат на результаты труда, так и в целях улучшения комфортности жизни. А производительность труда определяется четырьмя группами факторов:

- во-первых, социально-психологической склонностью к данному виду деятельности;
- во-вторых, квалификацией, которая, в свою очередь, складывается из знаний и умений (или компетенций);
- в-третьих, технологической оснащенностью деятельности, в настоящее время включающей в себя технический инструментарий и программный инструментарий;
- в-четвертых, организационно-социальными условиями труда.

Указанное определение производительности труда инвариантно к любым видам деятельности. Но его наполнение, конечно, полностью определяется конкретным видом деятельности.

История человечества, темпы развития человечества в значительной степени зависят от технологической оснащенности, которая изменялась волнообразно, как говорят, периодами технологических революций.

Я попробую кратко рассмотреть, как мы интерпретируем эти определения применительно к адекватной подготовке кадров для обеспечения эффективной инновационной деятельности в условиях текущей технологической революции.

Когда первобытный человек привязал к камню веревку и приспособил к камню ручку, произошла первая «технологическая революция».

Не вдаваясь в вопросы содержания технологических революций, отметим, что современный этап очередной, некоторые говорят, что четвертой, технологической революции в мире характерен несколькими особенностями.

Первая особенность – это существенное усложнение большинства создаваемых продуктов за счет объединения многочисленных и разнообразных функций в одном изделии. Такое усложнение, в свою очередь, требует органичной интеграции разнообразных по физическим принципам работы сенсорных, исполнительных, вычислительных элементов и устройств.

Вторая особенность современной технологической революции – это резкое повышение темпов создания инновационных продуктов во всех областях человеческой деятельности. Если 20–30 лет тому назад разработка и организация серийного производства любого сложного прибора или аппарата занимала 3–5 лет и с этим сроком все мирились, то сейчас все приборостроительные и аппаратостроительные предприятия стремятся к выпуску новых продуктов на рынок с темпом 1–1,5 года.

Очевидно, что реализация разработки инновационных продуктов с учетом этих особенностей невозможна без радикального пересмотра в сторону сокращения времени и трудоемкости выполнения всех этапов схмотехнического, конструкторского, технологического, программного проектирования продуктов, их отработки и испытаний, организации серийного производства, поддержки эксплуатации, включая регламентный контроль и ремонт. Основным методом сокращения времени и трудоемкости проведения указанных этапов является автоматизация всех выполняемых процессов на основе тотального использования цифровых решений и средств, в том числе интеллектуальных, т.е. на основе того, что сейчас начали называть «цифровизацией». Однако адекватная подготовка инженерных кадров, владеющих современным инструментарием и способных к самостоятельной творческой работе по созданию инновационных продуктов в новых условиях, не обеспечена даже в ведущих вузах страны.

В чем же состоят основные проблемы подготовки инженерных кадров для предприятий, основной функцией которых является создание инновационных продуктов, и как их решать? Рассмотрим эти вопросы на примере ВНИИА.

ВНИИА им. Н.Л. Духова является одним из ведущих предприятий Госкорпорации «Росатом». Предприятие было создано в 1954 году по инициативе академика Ю.Б. Харитона и до конца 80-х годов занималось исключительно оборонными задачами. Первым директором, главным конструктором и научным руководителем ВНИИА был член-корреспондент АН СССР Н.Л. Духов.

В 1986 году с началом т.н. «перестройки» в стране резко изменился порядок и объем финансирования НИОКР, изменилось отношение к атомной отрасли после Чернобыльской катастрофы, размылись принципы управления промышленностью, что все вместе привело к краху многие крупные оборонные предприятия. На мой взгляд, мы лучше многих других прошли и период «перестройки», и период «безвременья» 1990–1998 годов. В начале 90-х гг. прошлого

века ВНИИА одним из первых принял решение о развертывании работ по гражданской тематике. Мы сумели уже к середине 90-х сформировать и реализовать концепцию конверсии части нашего оборонного потенциала в востребованные на мировом рынке гражданские направления. Наши многочисленные контакты в 90-х годах с коллегами из США, Великобритании, Германии, Франции, КНР и многих других стран показали, что выбранные нами 4 гражданских направления, базирующихся на достижениях в оборонной области, ни в чем не уступают, а по ряду показателей превосходят все то, что имелось за рубежом. В течение 90-х и начале 2000-х годов мы провели разработки первых поколений наших гражданских изделий, радикально перестроили производство, организовав необходимое нам серийное производство всех разрабатываемых изделий, внедрили самые современные САПР и технологические процессы.

Накопленный к настоящему времени опыт работы по созданию и выпуску продукции гражданского назначения полностью подтвердил правильность выбранной концепции частичной конверсии института.

При этом то, что все гражданские направления базировались на «двойных» технологиях, позволяло плавно переключать специалистов с одного вида работ на другой вид, максимально используя достижения оборонных разработок в гражданской аппаратуре и наоборот.

В настоящее время численность работающих на предприятии составляет более 7 500 человек, в том числе более 215 кандидатов и докторов наук. Основные задачи ВНИИА им. Н.Л. Духова состоят в разработке, серийном производстве и поддержке эксплуатации нескольких классов инновационных продуктов для ряда оборонных и гражданских потребителей.

Наиболее важными и крупномасштабными по объему производства гражданских продуктов являются такие виды изделий, как программно-аппаратные средства для АСУ ТП атомных и тепловых электростанций, датчики давления для использования в нефтегазовых транспортных трубопроводных сетях и в системах охлаждения АЭС и ТЭС, портативные импульсные нейтронные генераторы и аппаратура на их основе, радиационные мониторы для контроля за несанкционированным перемещением радиоактивных материалов, электромеханические приборы различного назначения и ряд других. В институте за несколько десятилетий созданы и поставлены потребителям много поколений и широкая номенклатура подобных изделий. Ежегодный объем поставок таких изделий в настоящее время составляет несколько млрд. руб.

Все эти изделия на этапе своего создания и начала серийного производства являлись типичными инновационными продуктами, характеристики которых были лучше, чем у известных отечественных и зарубежных аналогов. При их создании удалось получить целый ряд новых научных и научно-технических результатов.

Разработка и информационная поддержка разработки указанных изделий ведутся в более чем 90 подразделениях главного конструктора и ИТ-отделения общей численностью более 2 500 человек. Диверсификация узких специальностей сотрудников этих подразделений очень высока, т.к. для успешного выполнения работ по созданию подобной номенклатуры изделий необходимы инженеры-специалисты в области системотехнического, схемотехнического, программного, конструкторского, технологического проектирования и эксплуатации электронной, электромеханической, ядерно-физической, электрофизической аппаратуры, приборов и комплексов измерения ионизирующих излучений, систем ядерной и радиационной безопасности, автоматизированных систем управления различными процессами, обладающих встроенными сенсорными и интеллектуальными свойствами, обеспечивающими возможность самоуправления, самообучения, самодиагностики. Такие продукты мы называем «киберфизическими» или «физико-техническими интеллектуальными» устройствами и считаем, что через 20–30 лет практически все создаваемые устройства будут относиться к этому классу.

Для поддержания стабильной численности подразделений главного конструктора во ВНИИА приходится в год принимать около 100 молодых специалистов.



К сожалению, многолетняя практика показала, что выпускники вузов в рамках известных нам образовательных программ не приобретают базовых компетенций, необходимых инженерам-разработчикам инновационных продуктов любых специализаций, относящихся к пониманию стадий жизненного цикла любых изделий, знания и понимания особенностей отработки серийно-способной продукции, умений трансформировать теоретические знания в практические процессы создания серийно-способных инновационных продуктов, знания нормативных документов, регулирующих эту деятельность, свободное владение разнообразными инструментами САПР, методами математического моделирования разрабатываемых изделий и т.п. Особенно ярко эти недостатки проявляются при привлечении выпускников вузов к разработке сложной программно-управляемой ядерно-физической, электрофизической и электромеханической аппаратуры. В результате, указанные компетенции молодые специалисты вынуждены приобретать в течение первых трех-четырёх лет работы в подразделениях предприятия.

В последние годы, в силу указанных выше особенностей современного подхода к разработке, от разработчиков требуются не только углубленные знания по перспективным методам создания киберфизических систем, но и серьезная научная проработка технических решений, которая раньше реализовалась только в рамках диссертационных работ.

Все сказанное привело нас к необходимости вмешаться в процесс подготовки кадров, сделав этот процесс более целенаправленным на реальные практические задачи, разработать и внедрить комплексную научно-образовательную систему, направленную на ускоренную подготовку высококвалифицированных специалистов, способных к разработке самых передовых киберфизических устройств и систем.

Эта система включает в себя:

- отбор школьников и студентов младших курсов, проявляющих повышенный интерес к проблематике киберфизических устройств и склонность к работе на таком предприятии как ВНИИА;
- разработанную нами совместно (МИФИ и ВНИИА) и внедренную на кафедрах ИФТИС «дуальную практико-ориентированную» модель образования на 3–4-м курсах бакалавриата и 1–2-ом курсах магистратуры, включающей в себя еженедельную стажировку студентов на рабочем месте предприятия, на которое предполагается трудоустроить студента после окончания вуза;
- привлечение молодых специалистов, хорошо проявивших себя в рамках стажировки и дипломной работы, в аспирантуру,
- организация активной поддержки и содействия выполнению молодыми специалистами диссертационных работ, направленных на поиск, разработку и научное обоснование новых схмотехнических, конструктивных, технологических, алгоритмических решений для создаваемой киберфизической аппаратуры.

Опыт показал, что крайне важными и продуктивными элементами всего указанного комплекса являются систематические научно-технические конференции, в рамках которых практически любой молодой специалист может несколько раз выступить с апробацией материала, который он часто готовит в качестве диссертационного исследования. Мы уже 15 лет ежегодно проводим подобные НТК, модель которых достаточно нестандартна. НТК проводится в рамках 11 секций по тематике разработок, ведущихся во ВНИИА. К участию приглашаются только сотрудники ВНИИА. Секции работают друг за другом, по полдня, в течение трех недель. Все для того, чтобы любой сотрудник мог посетить любой доклад на любой секции. Всего мы обычно заслушиваем 130–150 докладов. Как правило, мы рекомендуем, чтобы докладываемый материал был персонифицирован, т.е. доклады обычно имеют одного автора. 30–35% докладов занимают призовые места. Их авторы награждаются премиями в размере 25–35 тыс.руб. Все

докладчики конференции награждаются поощрительной премией 5 000 р. Лучшие доклады мы выдвигаем на отраслевые молодежные конференции. Следует отметить, что в последние годы среди призеров НТК оказывается несколько наиболее продвинутых стажеров, доклады которых становятся основой дальнейших диссертационных исследований.

Сейчас мы надеемся, что этот опыт целевых конференций может бы существенно закреплён и расширен в рамках планируемой в первой декаде февраля 2022 года Научно-практической конференции, которую мы проводим совместно силами ИФТИС НИЯУ МИФИ и ВНИИА.

Мы не случайно эту конференцию назвали научно-практической, т.к. хотели бы, чтобы все научные работы были нацелены и на практическое внедрение в рамках новых разработок.

Важнейшей задачей этих конференций, которые мы будем проводить ежегодно, но которую, возможно, мы еще не реализуем в этом году, будет задача стимулирования исследований и соответствующих докладов, в которых бы реализовались особенности, о которых я говорил. Т.е. стимулирование исследований, во-первых, по интеграции в новых изделиях разнообразных функций, свойств, возможностей, основанных на использовании методов машинного обучения, искусственных нейросетей и т.п., в сочетании с применением разнообразных сенсорных, вычислительных и исполнительных элементов и, во-вторых, по расширению использования разнообразных технических и программных средств автоматизации разработки и производства киберфизических устройств и систем.

Подведем итоги. Чтобы не начать отставать в разработке инновационных продуктов, надо постоянно воспроизводить кадры с повышенной квалификацией и способные обеспечить высокую производительность труда. Для этого нужно, чтобы кадры разработчиков систематически пополнялись молодыми специалистами:

- имеющими склонность к работе на таких предприятиях, как ВНИИА, а это значит, что нужен отбор еще на стадии школы;
- имеющими нужные знания, включающие знания по искусственному интеллекту и методам тотальной автоматизации, а это значит, что большинство дисциплин в вузе должно быть модернизировано;
- получившими умения по узкой специальности еще на стадии обучения в вузе в рамках стажировки на будущем рабочем месте.

Останется только предоставить этим кадрам технологии и оборудование и создать комфортные организационно-социальные условия в каждом подразделении.

Все это мы стремимся обеспечить силами ВНИИА и МИФИ.



## История создания, эволюция и развитие программно-технической платформы ТПТС

д.т.н., проф. Ю.Н. Бармаков, д.т.н. **В.Л. Кишкин**, к.т.н. А.Д. Нарич

ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова» – Москва, Россия

Доклад посвящен истории создания, развитию и применению программно-технической платформы ТПТС на АЭС и других энергетических объектах. Рассматриваются особенности и преимущества платформы, а также перспективы развития и применения.

## Creation History, Evolution and Development of Programm-technical Platform TPTS

Dr., Prof. Yu.N. Barmakov, Dr. **V.L. Kishkin**, PhD A.D. Narits

FSUE Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA) – Moscow, Russia

The goal of this paper is to review the history of engineering, development and application of program-technical TPTS-platform for atomic power stations and other power objects. In this work, some features and advantages of the platform are presented and also some promising development and application are considered.

Программно-техническая платформа ТПТС является основой для построения уровня автоматического управления АСУ ТП АЭС и других энергетических и промышленных объектов.

В 1993 году Росатом РФ поручил Всероссийскому научно-исследовательскому институту автоматики (ВНИИА) разработку и организацию программно-технических средств для создания современной конкурентоспособной АСУ ТП АЭС российского дизайна.

Существующие на тот момент в РФ разработки не отвечали современным международным требованиям, и ВНИИА произвел анализ современных иностранных платформ с целью их лицензионного производства. Были проанализированы ряд предложений авторитетных зарубежных фирм (в т.ч. Westinghouse, Merlin Gerin, Siemens и т.д.), и в результате был заключен лицензионный договор с фирмой Siemens на передачу технологии новейшей на тот момент разработки Teleperm MEA. Данная аппаратура была специально разработана для построения АСУ ТП энергетических объектов. В рамках данного договора российской стороне передавались права производить и продавать данные средства и системы на их основе. При этом была передана вся документация на аппаратные и программные средства,

Важнейшим аспектом договора было право самостоятельно модернизировать и развивать данную аппаратуру. ВНИИА адаптировал конструкторскую и программную документацию на соответствие российским стандартам, освоил технологию производства, провел в Германии полный комплекс испытаний, и, в результате, была подписана «декларация о соответствии», устанавливающая полное соответствие производимой во ВНИИА аппаратуры исходному оригиналу Teleperm MEA по функционалу и качеству. Данная аппаратура получила российское обозначение ТПТС51 и с 2000 г. поставлялась на различные электростанции как в России, так и за рубежом, в т.ч. и на объекты, сооружаемые фирмой Siemens. Оснащение большого количества тепловых энергоблоков дало возможность организовать серийный выпуск аппаратуры, при этом были отработаны технологии производства и получена обширная референция при-

менения. В процессе этих работ инженеры ВНИИА осваивали новые технологии и концепции управления.

Производство ТПТС сертифицировано германским сертификационным органом TÜV на соответствие требованиям стандарта качества ISO 9001.

После наработки опыта применения на тепловых электростанциях было получено разрешение на применение ТПТС51 на атомных энергоблоках. Первым объектом применения стал 3-й энергоблок Калининской АЭС (2003 год). Этот проект стал значительным событием, т.к. для АЭС ВВЭР впервые была создана цифровая система управления. При этом были реализованы следующие достижения:

- 1) существенное сокращение объема оборудования (всего 80 функциональных стоек на всю нормальную эксплуатацию и 3 канала безопасности);
- 2) впервые в системе безопасности применена цифровая техника;
- 3) высокая степень унификации (ТПТС51 применён в турбинном и реакторном отделении, включая три канала безопасности, а также во вспомогательных системах);
- 4) небывалый уровень автоматизации, не реализуемый на аналоговых системах;
- 5) высочайшая надежность аппаратуры, подтвержденная 20-летним опытом эксплуатации;
- 6) на этом проекте также получили богатый опыт проектные и наладочные организации, впервые освоившие технологии проектирования и наладки с помощью графических САПР.

Вслед за Калининской АЭС последовали АЭС «Бушер» (Иран) и 2 энергоблока «Куданкулам» (Индия).

Несмотря на успешность первых проектов, существовало понимание, что для сохранения конкурентоспособности на мировом рынке необходимы постоянные модернизация и развитие аппаратуры. К этому подталкивали постоянно ужесточающиеся требования по безопасности, новые предложения зарубежных и отечественных фирм, а также бурно развивающаяся электроника. В связи с этим с самого начала проводились работы по совершенствованию платформы ТПТС. Концепцией развития предусматривалось выполнение следующих целей:

- обеспечение конкурентоспособности (в т.ч. на мировых рынках);
- расширение областей применения;
- повышение объемов выпуска, снижение трудоемкости производства;
- упрощение эксплуатации, монтажных и пусконаладочных работ;
- повышение эффективности проектных работ;
- повышение надежности и отказоустойчивости;
- поддержка эксплуатации до 30 лет.

Источниками развития являлись:

- опыт применения ТПТС на объектах атомной и тепловой энергетики;
- отзывы, замечания и предложения потребителей;
- передовые тенденции в области построения АСУ ТП;
- передовые решения мировых лидеров в области создания и производства аппаратуры;
- тенденции развития технологий производства электронной аппаратуры и элементной базы.

При этом неукоснительно обеспечивалось выполнение следующих принципов:

- полное сохранение функциональных возможностей аппаратуры предыдущего поколения;
- совместимость информационной среды (физический уровень, форматы телеграмм);
- постепенное введение апробированных и испытанных новых элементов системы;
- развитие инструментальных средств с сохранением совместимости;
- поддержка эксплуатации в течение жизненного цикла энергоблока.

В рамках данной концепции последовательно были разработаны и внедрены четыре следующих поколения ТПТС.

**ТПТС-Е.** Здесь было реализовано радикальное улучшение информационной структуры, заключающееся в применении технологии Ethernet с сопутствующим повышением скорости передачи по системной шине в десятки тысяч раз. Разработаны средства регулирования турбины (ЭЧСР), на что получен патент совместно с фирмой Siemens. Применено в проекте Ростов-2.

**ТПТС-ЕМ.** Дальнейшее повышение эффективности и функциональности, совершенствование САПР, разработка средств приоритетного управления УСБТ. Применено в проектах Ростов-3, Ростов-4, Белоярская-4, Калинин-4, Нововоронежская АЭС-2 (1, 2). Заключен контракт на поставку на 3 и 4 энергоблока АЭС «Куданкулам» (Индия).

**ТПТС-НТ.** Радикально новая структура с разделением обработки на два уровня. Новая элементная база, повышение информационной мощности стоек, снижение потребляемой мощности, существенное повышение эффективности и диагностических возможностей. Применено в проектах Ленинградской АЭС-2 (1, 2) и Белорусской АЭС. Планируется к поставке на Курскую АЭС. В настоящее время ведется поставка на 2 энергоблока АЭС «Руппур» (Бангладеш). Платформа ТПТС-НТ сертифицирована германским сертификационным органом TÜV.

**ТПТС-СБ.** Специальная линейка аппаратуры, предназначенная для построения управляющих систем безопасности АЭС (1, 2). Аппаратура реализует выполнение всех современных мировых требований по безопасности, включая защиту от отказа по общей причине. На эту аппаратуру получен ряд патентов, ведется патентование в странах потенциального применения. В настоящее время в мире не существует аппаратуры, выполняющей в полной мере всех требований, что подчеркивает уникальность ТПТС-СБ. Платформа ТПТС-СБ сертифицирована германским сертификационным органом TÜV.

Помимо энергетики, платформа ТПТС активно внедряется в других отраслях. В частности, автоматизирован технологический процесс на одном из комбинатов ГК «Росатом» РФ, реализован ряд проектов в ПАО «Роснефть», ведется подготовка ряда новых контрактов.

Постоянно ведется дальнейшая работа по развитию платформы ТПТС. Так, линейка ТПТС-НТ развивается в направлении совершенствования компоновочных решений, повышения уровня унификации, сокращения габаритов аппаратуры, расширения функционала, реализации новых интерфейсов (в частности, МЭК 61859, МЭК 61870), повышения устойчивости системной шины EN, применения российской элементной базы.

ТПТС-СБ развивается в направлении реализации новых требований проектных организаций, в частности, введения функций гальванического размножения аналоговых сигналов.

Расширяются возможности САПР. Так, впервые реализован сквозной цикл проектирования, включающий технологическое проектирование, динамическое отслеживание технологического процесса, моделирование прикладных программ, верификацию прикладного ПО безопасности и т.д.

### **Заключение**

Программно-техническая платформа ТПТС является современным средством для создания АСУ ТП АЭС, а также других энергетических и промышленных объектов.

Применение и успешная эксплуатация ТПТС на 15 энергоблоках АЭС, более чем на 40 объектах тепловой энергетики, а также на объектах атомной и нефтяной промышленности подтверждает высокий научно-технический уровень, высокое качество и конкурентоспособность платформы ТПТС.

Постоянное совершенствование и развитие ТПТС обуславливает дальнейшее широкое применение платформы ТПТС для автоматизации АЭС и других энергетических и промышленных объектов.

## Ядерное приборостроение - направления развития на период до 2030 года

д.т.н. **С.Б. Чебышов**<sup>1</sup>, к.т.н. Д.Ю. Белкин<sup>1,2</sup>, д.т.н. И.И. Черкашин<sup>1</sup>, А.С. Гордеев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> АО «СНИИП» – Москва, Россия;

<sup>2</sup> АО «Русатом Автоматизированные системы управления» (АО «РАСУ») – Москва, Россия

В докладе показан достигнутый уровень состояния изделий ядерного приборостроения гражданского назначения. Рассмотрены основные виды радиометрической, спектрометрической и дозиметрической аппаратуры, приведен анализ соответствия технического уровня поставляемых приборов на ОИАЭ с требованиями основных потребителей – АС, предприятия АО «ТВЭЛ», ЦЯНТ и др. Изложены основные направления развития ядерного приборостроения, включая детекторы ионизирующего излучения, ядерную электронику, методы обработки и представления информации, применение методов моделирования и др.

## Directions of Development of Nuclear Instrumentation for the Period up to 2030

Dr. **S.B. Chebyshev**<sup>1</sup>, PhD D.Yu. Belkin<sup>1,2</sup>, PhD I.I. Cherkashin<sup>1</sup>, A.S. Gordeev<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> JSC "SNIIP" – Moscow, Russia;

<sup>2</sup> Rusatom Automated Control Systems JSC (RASU JSC) – Moscow, Russia

The report shows the achieved level of the state of products of nuclear instrumentation for civil purposes. The main types of radiometric, spectrometric and dosimetric equipment are considered, an analysis is made of the compliance of the technical level of instruments supplied to nuclear facilities with the requirements of the main consumers - nuclear power plants, enterprises of TVEL JSC, NSTC, etc. The main directions in the development of nuclear instrumentation are outlined, including ionizing radiation detectors, nuclear electronics, methods for processing and presenting information, the use of modeling methods, etc.

### Немного истории

Стройная и эффективная организационная и научно-производственная система отечественного ядерного приборостроения, включавшая в себя три научно-исследовательских института – Союзный НИИ приборостроения (СНИИП), НИИ теплофизической аппаратуры (НИИТФА), Рижский НИИ радиоизотопного приборостроения (РНИИРП) – и пять серийных приборных заводов, существовала в атомной отрасли до 90-х гг. прошлого века. СНИИП являлся головной организацией по разработке приборов и систем измерения ионизирующего излучения для всех направлений науки и промышленности – от атомной энергетики до космонавтики и медицины, НИИТФА был головным институтом по созданию специальных приборов и оборудования технической физики, включая детекторы ионизирующего излучения, изотопные источники электрической энергии, приборы неразрушающей технической диагностики, масс-спектрометрические комплексы и приборы рентген-флуоресцентного анализа, а РНИИРП был головным разработчиком радиоизотопных приборов, широко применявшихся в металлургической, химической и горнодобывающей промышленности. С середины 70-х годов прошлого века РНИИРП стал головным научным центром по созданию детекторов ионизирующего излуче-

ния на основе полупроводниковых структур и разработке технологий промышленного выпуска таких детекторов.

Общая экономическая ситуация в стране в конце 90-х – начала 2000-х гг. негативно сказалась на существующей научно-производственной системе ядерного приборостроения. Связи между предприятиями нарушились, заказы на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы практически прекратились.

В дальнейшем, по мере общей активизации работ в атомной отрасли и возобновления строительства атомных энергоблоков, как в РФ, так и в рамках международных проектов наметился рост стимулов развития практически всех направлений ядерного приборостроения, и прежде всего, в развитии компонентов систем управления ядерными энергетическими реакторами, радиационного контроля, дозиметрии.

### **Ядерное приборостроение – краткое введение**

В настоящее время ядерное приборостроение обеспечивает все основные потребности отрасли как в системах управления и обеспечения безопасности ядерных реакторов, так и в радиометрических, дозиметрических и спектрометрических аппаратурных комплексах, предназначенных для оснащения как оборонных, так и промышленных объектов.

Ядерное приборостроение играет важнейшую роль в обеспечении эффективной безопасной работы всех без исключения объектов использования атомной энергии: энергоблоков АЭС, исследовательских ядерных реакторов, предприятий ядерного топливного цикла, хранилищ радиоактивных отходов и пр. Причем, говоря об актуальных вопросах развития отраслевого приборостроения, имеет смысл, прежде всего, напрямую связывать этот процесс с интенсификацией развития отечественной ядерной энергетики и расширением присутствия России на международных рынках ядерных энерготехнологий. Очевидно, что без конкурентоспособного приборостроения, позволяющего создавать современные, отвечающие всем нормативным требованиям и международным стандартам АСУ ТП и системы контроля, управления и безопасности реакторных установок, невозможно построить конкурентоспособный, эффективный и безопасный энергоблок АЭС, обеспечить эффективную и безопасную работу разделительных производств, технологий по переработке ОЯТ.

Современные ядерные технологии – это органическое единство технологий переработки ядерных и радиоактивных материалов и выработки энергии и ядерных информационно-измерительных технологий – технологий получения и обработки измерительной информации для контроля и управления ядерными и радиационными технологическими процессами.

Анализ развития отрасли показал, что успех этого развития стал возможным во многом благодаря тому, что практически одновременно были начаты работы как по созданию непосредственно самих ядерных технологий, так и принципиально новой приборной базы, развитие которой, в свою очередь, непосредственно связано с динамическим развитием таких областей, как ядерная физика, электроника, вычислительная техника и информатика. Ядерное приборостроение стало одним из ключевых компонентов развития ядерных технологий. В соответствии с принятой классификацией в состав изделий ядерного приборостроения входят следующие основные типы аппаратуры:

- системы контроля и управления реакторными установками;
- системы радиационного контроля;
- спектрометры и спектрометрические комплексы;
- радиометры и радиометрические установки;
- дозиметры и дозиметрические системы;
- специализированная аппаратура различного назначения.



На рис.1 представлены основные области применения и технические средства ядерного приборостроения.

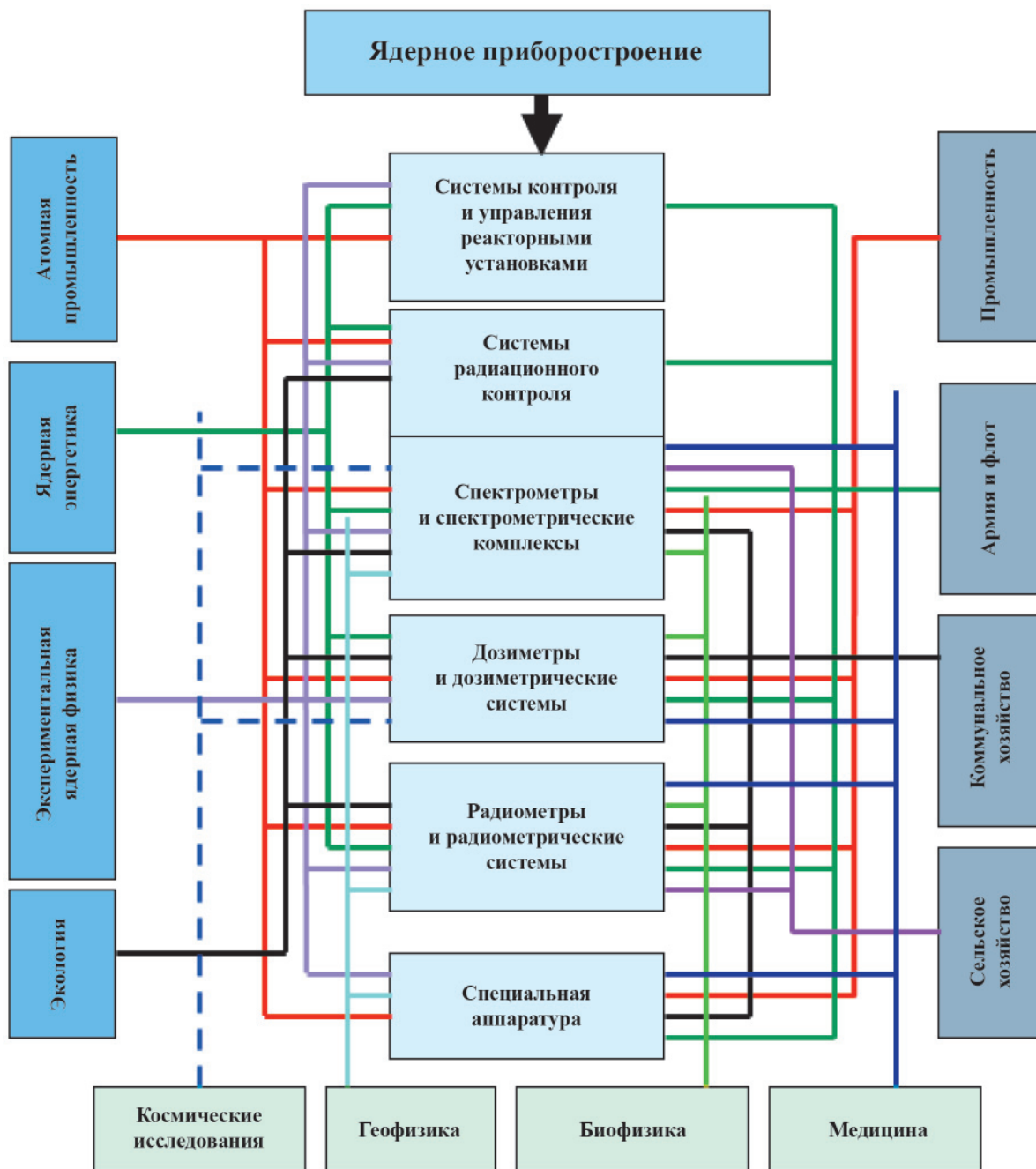


Рис. 1. Основные области применения ядерного приборостроения

### Ядерные информационно-измерительные технологии

Одним из ключевых элементов современного ядерного приборостроения являются ядерные информационно-измерительные технологии (ЯИИТ), предназначенные для получения количественной и качественной информации о состоянии контролируемого объекта. ЯИИТ играют важную роль в решении задач повышения эффективности работы предприятий топливного цикла и АЭС, обеспечения безопасности функционирования сложных технологических

комплексов атомной промышленности, повышения уровня безопасности населения и персонала и снижения техногенных рисков, связанных с ядерными технологиями, а также защиты окружающей среды средствами радиоэкологического мониторинга.

### **Основные направления развития ядерного приборостроения**

Как отмечалось выше задачи повышения эффективности работы предприятий топливного цикла и АЭС, обеспечения безопасности функционирования сложных технологических комплексов атомной промышленности, повышения уровня безопасности населения и персонала, а также защиты окружающей среды определяют следующие основные направления развития ядерного приборостроения:

1. Разработка комплексного сквозного цифрового процесса «Разработка изделий ядерного приборостроения» с интегрированием модулей: «Физика» – «Ядерная электроника» – «Конструирование» – «Моделирование» – «Метрология – Испытания» – «Архив» – «Анализ эксплуатации» – «Улучшения/модернизация – НИОКР»;

2. Решение задач:

– программно-математического моделирования детекторов, блоков и устройств детектирования с учетом условий применения;

– 3D-моделирования различных сценариев при проектных расчётах измеряемых радиационных параметров;

3. Разработка на основе принципов ИИ алгоритмов предиктивной диагностики целостности защитных барьеров/прогнозирования событий и выработки рекомендаций для действий оперативного персонала;

4. Разработка новых типов микросхем для ядерной электроники в рамках отраслевой программы;

5. Разработка программно-аппаратных средств цифровизации ядерной электроники;

6. Развитие работ по созданию «интеллектуальных» приборов и измерительных каналов, обеспечивающих управление процессом измерения, для получения максимально точной информации за минимальное время в условиях спонтанного воздействия внешних дестабилизирующих факторов;

7. Развитие научно-технологической базы для синтеза новых типов сцинтилляционных детекторов.



Секция

« Информационно-измерительные  
и управляющие системы »

Председатель секции  
**Кишкин Владимир Львович**,  
доктор технических наук,  
заведующий кафедрой №2 НИЯУ МИФИ,  
первый заместитель главного конструктора -  
начальник научно-производственного комплекса 1  
ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»



## **Модель узла детектирования для цифровых двойников каналов контроля нейтронного потока**

**И.В. Аляев**, к.т.н. А.О. Толоконский, И.Г. Кулло

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ – Москва, Россия

Разработана и программно реализована модель узла детектирования для построения и исследования характеристик каналов контроля нейтронного потока. Представлены характеристики модели, функциональные возможности, а также результаты ее тестирования.

## **Model of the Fission Chambers Detector Unit for a Digital Twins of the Neutron Flux Monitoring Equipment**

**I.V. Alyaev**, PhD A.O. Tolokonskiy, I.G. Kullo

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute) – Moscow, Russia

A model of the fission chambers detector unit for a neutron flux monitoring equipment verification was developed and implemented. The characteristics of the model and testing results are presented.

Использование цифровых двойников каналов контроля нейтронного потока позволяет значительно сократить трудоёмкость разработки таких каналов и верифицировать измерительные алгоритмы до проведения испытаний с использованием источников ионизирующего излучения.

Современные каналы контроля нейтронного потока состоят из узла детектирования, представляющего собой сборку из одной или нескольких ионизационных камер деления (ИКД), и аппаратуры контроля нейтронного потока (АКНП), которая обрабатывает сигнал данной камеры. Наиболее часто АКНП представлена тремя основными измерительными трактами – импульсным, флуктуационным и токовым. Каждый из этих трактов покрывает определенный диапазон плотности потока нейтронов [1]. Для определения результирующей плотности потока нейтронов по показаниям данных трактов используются алгоритмы их сопряжения.

Одним из ключевых и наиболее сложных с точки зрения моделирования компонентов каналов контроля нейтронного потока является узел детектирования. Сигнал ИКД в узле детектирования представляет собой последовательность случайных импульсов, которые накладываются друг на друга при увеличении их количества на большой плотности потока нейтронов. Сложность моделирования такого сигнала заключается в необходимости расчета наложений большого числа случайных импульсов.

Существующие модели ИКД, которые могут быть использованы для реализации модели узла детектирования, обладают рядом недостатков. В настоящее время имеются модели, которые основаны на детальном описании физических принципов работы ИКД [2]. Такое описание значительно повышает требования к вычислительным мощностям при реализации цифрового двойника. Также данные модели привязаны к геометрии и другим характеристикам ионизационной камеры, что ограничивает их использование. Оптимальными в плане универсальности и низким требованиям к вычислительным мощностям являются модели, которые описывают сигнал в виде суперпозиции случайных импульсов. Однако такие модели имеют ограничения на задаваемые параметры сигнала – скорость счета импульсов, форму импульса и спектра зарядов в импульсах [3].

Целью данной работы является разработка модели мультidetекторного узла детектирования каналов контроля нейтронного потока для цифровых двойников. Модель должна позволять верифицировать как измерительные тракты по отдельности, так и алгоритмы их сопряжения. Кроме этого, для моделирования узлов детектирования, состоящих из нескольких камер деления, модель должна вычислять некоррелированные сигналы всех камер, и при этом такие сигналы должны обладать независимыми характеристиками (форма импульсов и спектр зарядов в импульсах).

Для реализации модели узла детектирования использовалась математическая модель суперпозиции случайных импульсов. Такая модель в общем случае описывается следующим уравнением:

$$y(t) = \sum_{i=1}^m A_i f(t - \tau), \quad (1)$$

где  $A_i$  – случайная амплитуда  $i$ -го импульса, распределение которой определяется заданным спектром зарядов в импульсах;  $f(t)$  – заданная форма импульсов;  $\tau$  – случайные моменты времени возникновения импульсов, при которых поток импульсов во времени подчиняется закону распределения Пуассона.

Форма импульса  $f(t)$ , а также распределение случайной величины  $A$  задаются пользователем, что позволяет моделировать сигналы камер деления различных типов через использование экспериментальных форм импульса и спектра распределения зарядов, которые получены при измерении.

Так как измеряемая скорость счета может достигать значений  $10^9 \text{ с}^{-1}$ , то непосредственный расчет сигнала  $y(t)$  требует больших вычислительных мощностей и большого времени моделирования из-за требуемого малого такта моделирования. Это необходимо для обеспечения пуассоновского потока импульсов. Для устранения этого недостатка в модель вводится упрощение, при котором на одном такте может возникать более одного импульса. При этом упрощенный сигнал описывается следующим уравнением:

$$y(k) = \sum_{i=0}^N (f_k \cdot x(k - i)), \quad (2)$$

где  $k$  – такт моделирования;  $f_k$  – постоянные коэффициенты, описывающие заданную форму импульса;  $x$  – поток импульсных функций, заданных уравнением:

$$x(k) = \sum_{j=0}^P (a_j), \quad (3)$$

где  $a_j$  – случайная величина, распределение которой определяется заданным спектром зарядов в импульсах;  $P$  – случайная величина, подчиняющаяся распределению Пуассона с параметром  $\lambda$ , равным произведению скорости счета на временной шаг моделирования.

Такое упрощение позволяет значительно ускорить моделирование благодаря возможности выбора меньшего такта моделирования и возможности использования операций векторного умножения. При этом потери в точности моделирования незначительны с точки зрения использования данной модели в целях верификации измерительных алгоритмов каналов контроля нейтронного потока.

Разработанная модель сигнала, представленная в уравнениях (2) и (3), была реализована и протестирована в среде Matlab. Программная реализация позволяет вычислять  $N$  некоррелированных сигналов ИКД, находящихся в одном узле детектирования. При этом все случайные величины генерируются независимо для каждой камеры.

Также в программной реализации модели узла детектирования может быть использована передаточная функция электрической цепи, которая предназначена для первичной обработки сигнала ИКД перед его подачей на входы измерительных трактов. Это позволяет моделировать поведение измерительного преобразователя.

Разработанная модель тестировалась с использованием полученных экспериментальных форм импульса и спектра зарядов. При тестировании модели определялись параметры, важные для измерительных трактов АКНП.

Для импульсного тракта, который используется на низких плотностях потока нейтронов, необходимо обеспечить экспоненциальное распределение интервалов времени между импульсами с математическим ожиданием, пропорциональным скорости счета. Проверка соответствия модельного распределения интервалов времени между импульсами экспоненциальному распределению проводилась с помощью критерия согласия Колмогорова с уровнем значимости 5% (рис. 1).

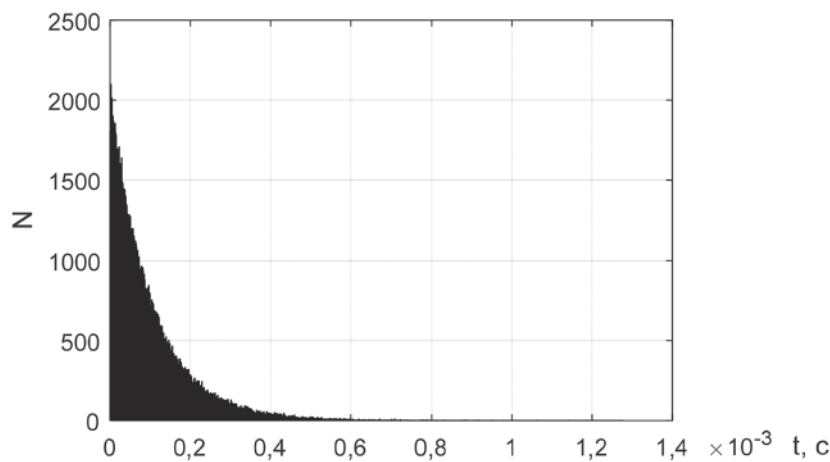


Рис. 1. Распределение интервалов времени между импульсами на скорости счета  $10^4 \text{ c}^{-1}$

Проверка показала, что полученные выборки интервалов времени между импульсами соответствуют экспоненциальному распределению.

Для флуктуационного и токового измерительных трактов требуется обеспечить пропорциональность математического ожидания и дисперсии значению скорости счета и, соответственно, плотности потока нейтронов. В качестве оценки пропорциональности использовался параметр нелинейности, представляющий собой отклонение значений математического ожидания и дисперсии от идеализированной прямой линии (рис. 2).

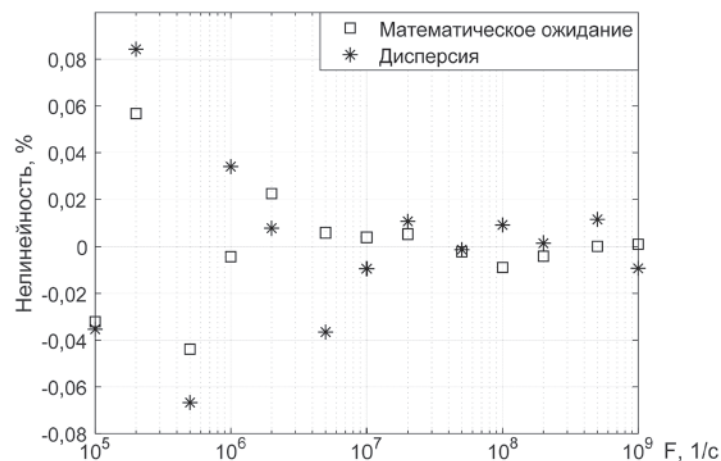


Рис. 2. Нелинейность математического ожидания и дисперсии

Оценка нелинейности проводилась для диапазона скоростей счета от  $10^5 \text{ с}^{-1}$  и выше, так как на более низких скоростях счета работает импульсный тракт. Наибольшее отклонение от линейной функции составило не более 0,1% для математического ожидания и дисперсии.

Также для флуктуационного тракта важным параметром является спектральная плотность сигнала. Данный тракт измеряет дисперсию сигнала в полосе частот электронной компоненты сигнала ИКД, так как в этой полосе дисперсия пропорциональна плотности потока нейтронов [4]. На рис. 3 представлена спектральная плотность смоделированного сигнала с использованием ионной и электронной компоненты.

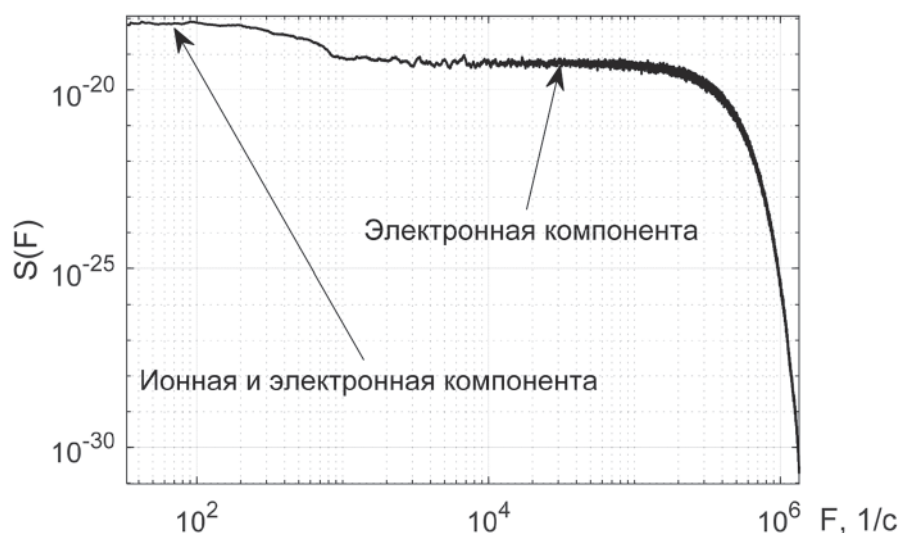


Рис. 3. Спектральная плотность модели сигнала ИКД

Преимуществом разработанной модели является малое время вычисления сигнала при сохранении достаточной точности воспроизведения статистических параметров сигнала, важных для каналов измерения плотности потока нейтронов. Данное преимущество реализуется благодаря тому, что модель построена не на детальном физическом описании принципов работы камер деления, а на упрощенном математическом описании сигнала в виде суперпозиции случайных импульсов. Это позволяет значительно сократить время моделирования и вычислительные ресурсы без существенных потерь точности воспроизведения сигналов. Также модель обладает гибкостью, заключающейся в возможности независимо для каждой камеры задавать множество различных параметров. Такая гибкость позволяет реализовать модели узлов детектирования различного типа, которые используются в существующих и перспективных каналах контроля нейтронного потока.

### Список литературы

1. Е.К. Малышев, Ю.Б. Засадыч, С.А. Стабровский. Газоразрядные детекторы для контроля ядерных реакторов. – Москва : Энергоатомиздат, 1991. – С. 18–42.
2. G. de Izzara, M. Lamotte, S. Breaud, A. Pepino, P. Filliatre, C. Jammes. COSICAF, a fission chamber simulation tool for academic purposes. – EPJ Web of Conferences, 2020 – DOI : <https://doi.org/10.1051/epjconf/202022510003>.
3. Zihao Liu, Xiang Zhou, Renjie Zhu, Li Zhao, Lingfeng Wei, Zejie Yin. Simulation Study on the Wide-Range Measuring Algorithm in ITER Neutron Flux Monitor. – Fusion Science and Technology, vol. 75, issue 2, 2018. – 127–136.
4. R. Hunt. Testing Fission Chambers. – Nuclear Engineering International Magazine, 2011 – URL: <http://www.neimagazine.com/features/featuretesting-fission-chambers>.

## Тензомодуль датчика давления со встроенным датчиком температуры и защитой от механических перегрузок

**М.В. Басов**

ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова» – Москва, Россия

Разработан и исследован малогабаритный кристалл датчика температуры в виде диода Шоттки с пониженным энергопотреблением, повышенным пробивным напряжением и высоким линейным температурным коэффициентом, расположенный в едином корпусе тензомодуля датчика давления. Представлен спектр преимуществ разработки относительно применяемого аналога датчика температуры в виде дискретных элементов для внешней схемы обработки сигнала датчика давления. Дополнительно сборочные конструкции кристалла датчика давления используют механические упоры с двух сторон для увеличения механической прочности датчиков давления для диапазонов до 25, 60 и 160 кПа, повышающих момент разрушения от 3 до 5 раз в зависимости от диапазонов.

### Pressure Sensor with Temperature Sensor and Defense for Overload Pressure

**M.V. Basov**

FSUE Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA) – Moscow, Russia

The small-sized temperature sensor chip in a form of Schottky diode with reduced consumption, increased breakdown voltage and high linear temperature coefficient was developed. The temperature sensor chip is located in the single case of pressure sensor module. The research presents development adventures over previously used analogs of temperature sensor for external circuit of pressure sensor. Additionally, the assembly for pressure sensor chip for 25, 60 and 160 kPa ranges uses stops for both sides. It helps to increase the moment of burst pressure from 3 to 5 times relativity assembly without stops.

#### Введение

Начиная с 2014 г. во ФГУП «ВНИИА» налажено серийное производство тензомодулей датчиков давления (ТДД) ТЖИУ.408854.026 для 6 видов модификаций, отличающихся диапазоном измеряемого давления. ТДД (рис. 1) является головным элементом в составе датчика давления (ДД).

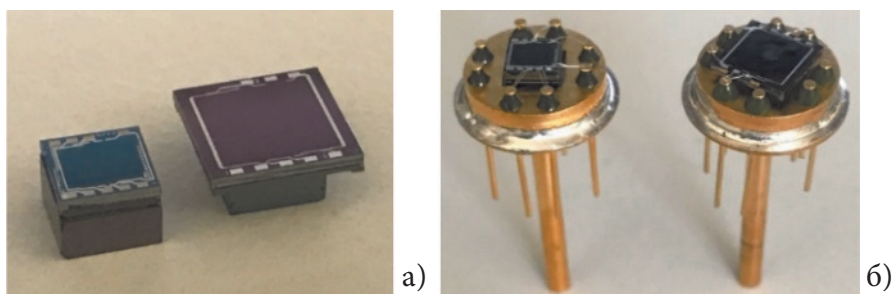


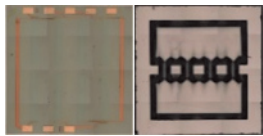
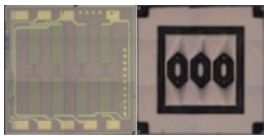
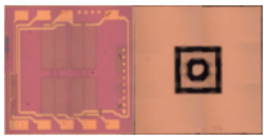
Рис. 1. Фото ТЖИУ.408854.026: а) кремниевая конструкция; б) ТДД



ТДД содержит кремниевый кристалл ДД (в составе кремниевой конструкции, рис. 1а), выполненный в виде микроэлектромеханической системы и функционирующий на базе тензорезистивного эффекта с использованием мостовой схемы. Существует 3 вида топологий лицевой части кристалла ДД, и для каждой из топологий лицевой части существует ряд конструкций мембранной структуры (табл. 1). Различные виды кристаллов ДД необходимы для балансного сочетания пороговой чувствительности (первостепенно) и основных/дополнительных погрешностей ТДД в зависимости от диапазона измеряемого давления [1–6].

Таблица 1

Виды модификаций кристаллов ДД для ТДД ТЖИУ.408854.026

ТЖИУ.408854.026	-01	-02	-03	-04	-05	-06
Кристалл ДД	ИПД52		ИПД60		ИПД91	
Вид (габаритные размеры кристалла/ мембраны, мм <sup>2</sup> )	 (6,15×6,15 / 4,20×4,20)		 (4,00×4,00 / 2,21×2,21)		 (4,00×4,00 / 1,10×1,10)	
Диапазоны P, кПа	1,6–25,0		10–60	25–160	100–600	1000–6000 1600–16000
Чувствительность S, мВ/кПа/В	> 1,500		> 0,460	> 0,216	> 0,076	> 0,003 > 0,002

### Недостатки ДД с ТЖИУ.408854.026

ТЖИУ.408854.026 для измерения дифференциального давления собираются изначально в гидроблок (ГБ) ДД и затем в полную конструкцию ДД. В ходе применения ДД выявлено два недостатка. Первый: разрушение кристалла ДД при пусконаладочных/аварийных ситуациях у потребителя. В составе ГБ применяется система сильфонов, позволяющая снизить перегрузочное давление на ТДД, но скорость срабатывания механизма довольно низкая, поэтому в первоначальный момент кристалл ДД может сломаться. Второй: для термокомпенсации погрешностей ДД внешняя схема использует данные с датчика температуры (ДТ), расположенного на существенном расстоянии от ТДД. Существует рассогласованность температурных реакций между ТДД и ДТ из-за наличия системы корпусных элементов, заполненных кремнийорганической жидкостью ПМС-20Р. Используется два варианта ДТ в виде дискретных элементов, каждый из которых имеет свои недостатки (помимо того, что элементы не являются внутренней продукцией предприятия и не могут быть расположены внутри ТДД) – это: 1) параллельное соединение стабилатора КС119 ( $U_{np} = 1,7 \dots 1,8$  В при  $I_{np} = 1$  мА) и диода КД522А, необходимого для повышения пробивного напряжения ( $U_{проб} = 30$  В) в случаях некорректных замыканий во внешней цепи. ДТ имеет высокое энергопотребление, сравнительно низкое пробивное напряжение и низкий температурный коэффициент ( $TK$ )  $TK = -3300$  ppm/°C; 2) диод Шоттки Diodes 1N5817 ( $U_{np} = 0,19$  В при  $I_{np} = 1$  мА,  $TK = -7400$  ppm/°C). ДТ имеет сравнительно низкое пробивное напряжение  $U_{проб} = 40$  В. ТЖИУ.408854.043 способен минимизировать недостатки по термокомпенсации в ДД за счет использования нового кристалла ДТ в едином корпусе ТДД. Также ТЖИУ.408854.043 для номинальных давлений до 25, 60 и 160 кПа содержит сборочную конструкцию кристаллов ДД с механическими упорами от пневмоудара.

### ДТ в составе ТДД ТЖИУ.408854.043

Разработан и реализован по планарной технологии кремниевый кристалл ДТ в виде диода Шоттки (ПДШ) (рис. 2).

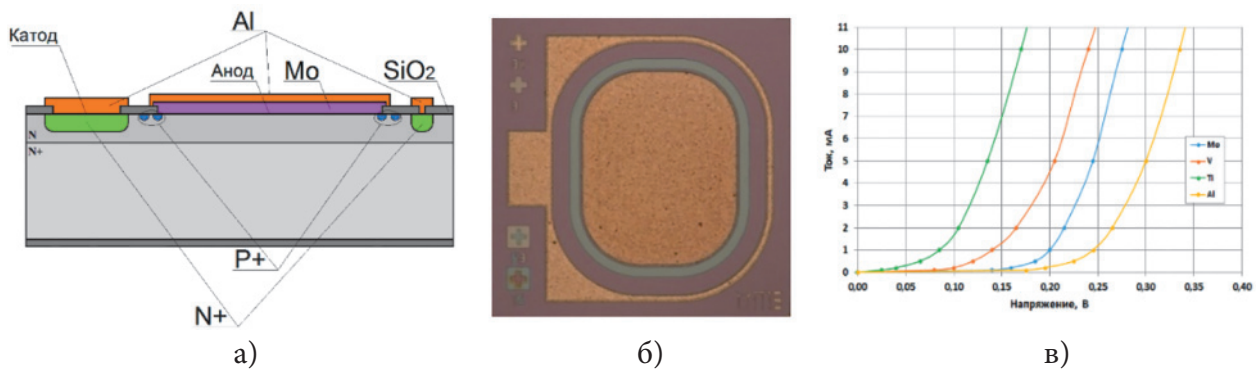


Рис. 2. Кристалл ПДШ: а) боковой разрез; б) фотография образца; в) график для прямой ветви ВАХ

Преимущества кристалла ПДШ:

- 1) малые габариты  $0,8 \times 0,8 \times 0,4 \text{ мм}^3$ ;
- 2) низкое энергопотребление на прямой ветви вольт-амперных характеристик (ВАХ)  $U_{пр \text{ ПДШ}} = 0,19 \dots 0,23 \text{ мВ}$  при  $I_{пр} = 1 \text{ мА}$ ;
- 3) высокое пробивное напряжение  $U_{проб \text{ ПДШ}} > 85 \text{ В}$ ;
- 4) высокий  $TK_{\text{ПДШ}} = -1,60 \dots -1,68 \text{ мВ/}^\circ\text{C}$  ( $-7600 \dots -8000 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$ ) при низкой погрешности  $dTK < 0,4\%$  для диапазона  $T = -65 \dots +85 \text{ }^\circ\text{C}$ .

На лицевой стороне кристалла ПДШ, полученного на эпитаксиальной структуре кремния 15КЭФ2,2/380КЭС0,01(100), сформированы области в следующей последовательности микроциклов:

- 1)  $n^+$  типа проводимости для контакта к подложке (катод,  $x_{jn^+} = 7,6 \text{ мкм}$ ,  $W_{\text{SiO}_2n^+} = 0,48 \text{ мкм}$ ,  $R_{\text{Sn}^+} = 1,2 \text{ Ом/см}^2$ );
- 2)  $p^+$  типа проводимости для охранных колец ( $x_{jp^+} = 1,3 \text{ мкм}$ ,  $W_{\text{SiO}_2p^+} = 0,20 \text{ мкм}$ ,  $R_{\text{Sp}^+} = 72 \text{ Ом/см}^2$ );
- 3) контактные окна;
- 4) слой металла Мо для барьера Шоттки ( $W_{\text{Mo}} = 0,3 \text{ мкм}$ );
- 5) слой металла Al для разварки ( $W_{\text{Al}} = 0,8 \text{ мкм}$ ).

Изначально было исследовано 4 вида слоя металлов для барьера Шоттки из Мо, Al, V и Ti. Слои V и Ti, продемонстрировав лучшие характеристики по прямой ветви ВАХ, не удалось технологически. Падение напряжения прямой ветви ВАХ на Мо ниже, чем на Al (рис. 2в). Благодаря геометрии охранных колец происходит смыкание областей пространственного заряда (ОПЗ) в момент достижения их пробоя каждого в отдельности [7–9], что повышает пробивное напряжение с 70 В до 85 В. Кристалл ПДШ был размещен в корпусе ТДД ТЖИУ.408854.043 на расстоянии менее 1 мм (рис. 3б, 3в). Из рис. 3а видно, что прежние варианты ДТ располагаются в отдалении ( $\approx 40 \text{ мм}$ ) от ТДД. Для анализа разницы работ ДТ в виде соединения «стабистор+диод» и кристалла ПДШ между собой и относительно кристаллов ДД были рассмотрены два образца ГБ ДД. Исследования проводились для всех элементов ГБ ДД одновременно в режимах, указанных на рис. 4 (кривая 1 относится к правой оси ординат, 2 – к левой). Сопротивление схемы кристалла ДД изменяется нелинейно в рабочем диапазоне  $T = -65 \dots +85 \text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 4а). Актуально рассматривать функции всех элементов на наиболее линейной области  $T = -20 \dots +80 \text{ }^\circ\text{C}$  (погрешность линейной аппроксимации до  $\sigma_T = 7 \text{ }^\circ\text{C}$ ). На рис. 4б показана разница измерений температур для двух видов ДТ между собой (до  $\Delta T = 12 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Для наглядности симметричности реакций для всех элементов необходимо оценить скорости изменения выходных сигналов от температуры, взяв первую производную по температуре. Из рис. 4д, 4е для ДТ в виде кристалла ПДШ видно, как скорости реакций существенно приближаются к скоростям на кристалле ДД, в отличие изменений для ДТ в виде «стабистор+диод» на рис. 4в, 4г.

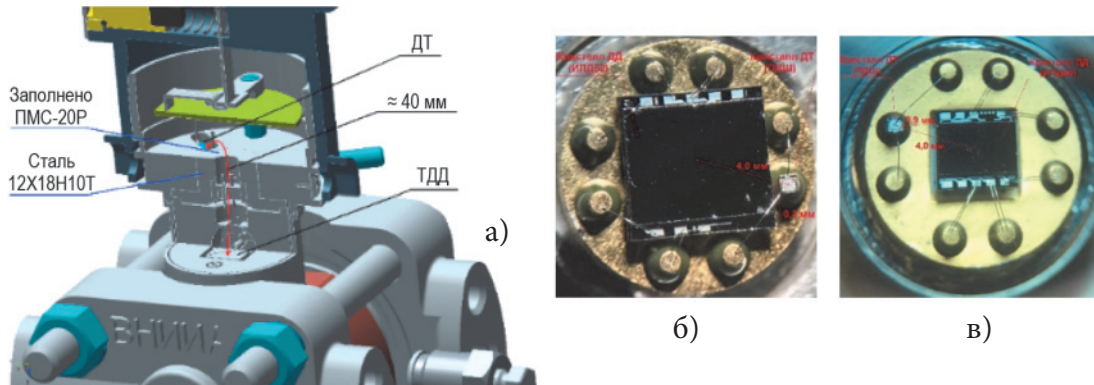


Рис. 3. Расположение ДТ: а) в ГБ ДД с ТДД ТЖИУ.408854.026; б) в ТДД ТЖИУ.408854.043 (до 25 кПа); в) в ТДД ТЖИУ.408854.043 (до 60 и 160 кПа)

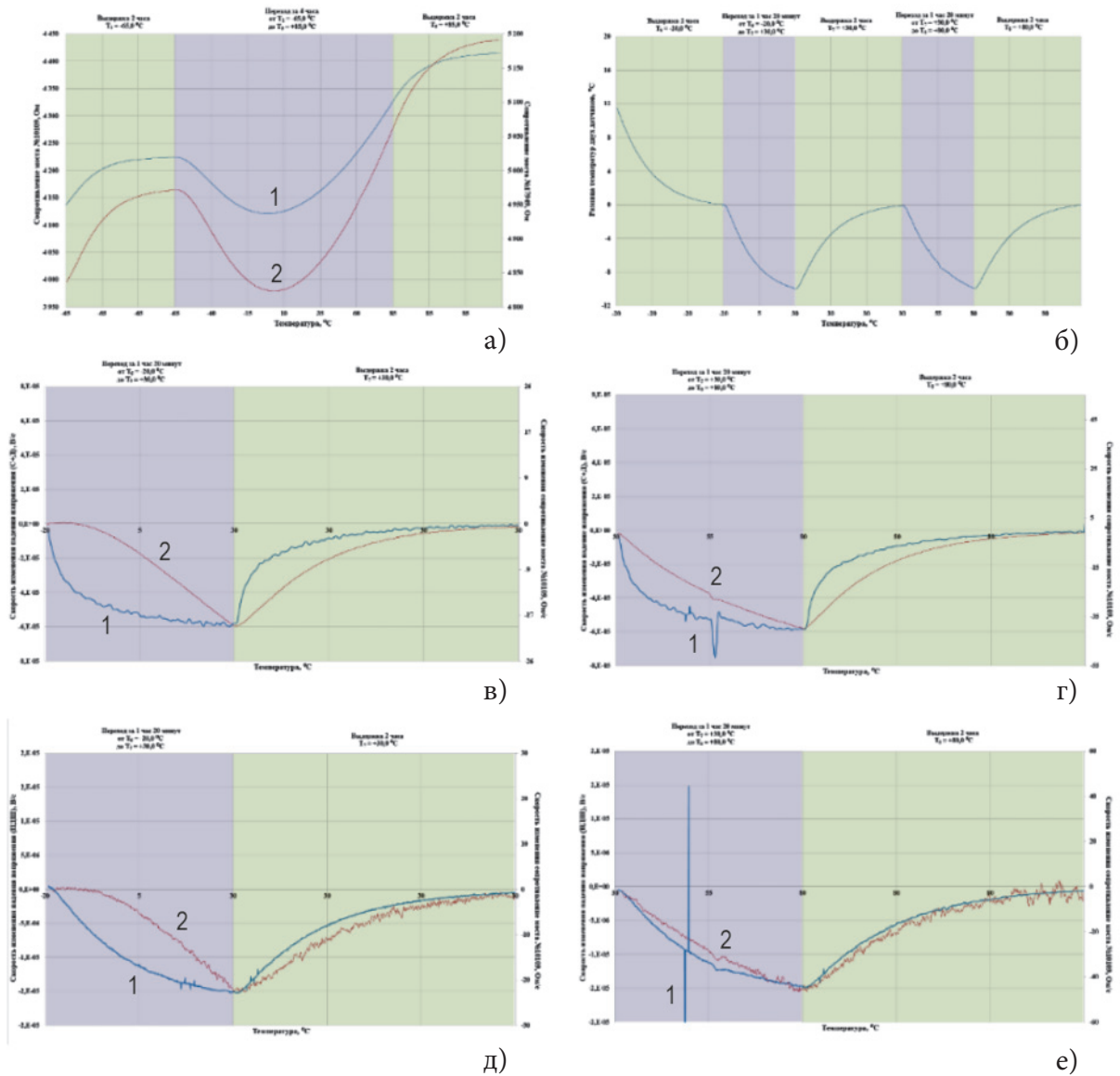


Рис. 4. Графики зависимости от температуры: сопротивления кристаллов ДД (а); разницы работ двух ДТ (б); скоростей реакции на ДТ «стабистор+диод» и на кристалле ДД (-20...+30 °С) (в) и (+30...+80 °С) (г); скоростей реакции на ДТ «кристалл ПДШ» и на кристалле ДД (-20...+30 °С) (д) и (+30...+80 °С) (е)



### Повышенная механическая прочность ТДД ТЖИУ.408854.043

Для защиты ДД при пневмоударе перегрузочным давлением ТДД ТЖИУ.408854.043 содержат сборочные конструкция кристаллов ДД с упорами для диапазонов дифференциального давления до 25, 60 и 160 кПа (рис. 5а, 5б и рис. 3б, 3в). Требуемый зазор между поверхностями мембраны и поверхностью упоров достигается за счет толщины соединительного стекла С65-1. Зазор между поверхностями мембраны и упорами позволяет беспрепятственно функционировать кристаллу ДД в пределах номинальных давлений. В табл. 2 представлены значения перегрузочного давления для ТДД с упорами (преимущества от 3 до 5 раз) и без, а также диапазон давления-посадки мембраны на упоры (рис. 5в, 5г, 5д). Исследования ТДД продемонстрировали, что процент выхода годных ТДД ТЖИУ.408854.043 фактически равен средним показаниям процента выхода годных ТДД ТЖИУ.408854.026, используемых при серийном производстве. Также проведены исследования по посадке мембраны на упор при  $T = +80\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $T = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$  в составе ГБ ДД, заполненных кремнийорганической жидкостью, которые доказали, что момент срабатывания защиты происходит при одинаковом давлении, что и при  $T_{\text{комн}} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  в ТДД на воздухе.

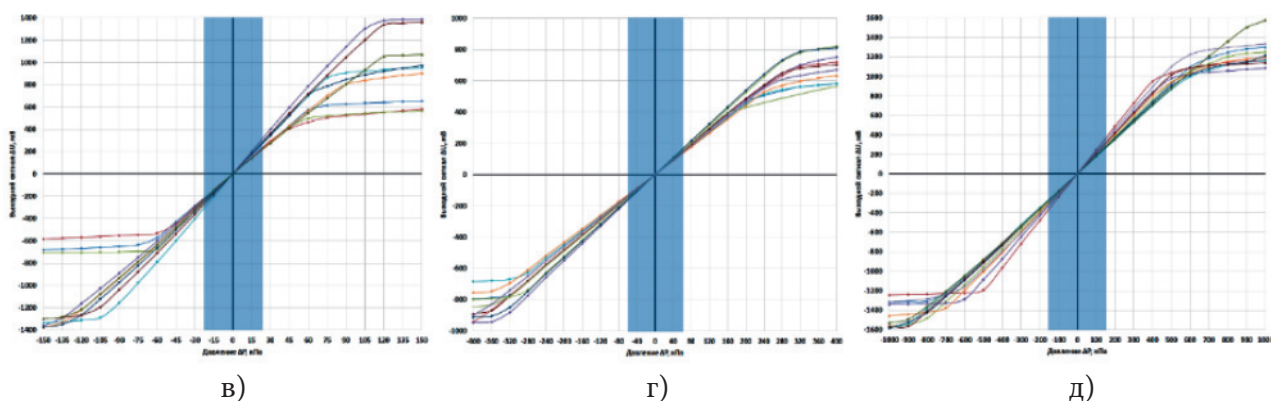
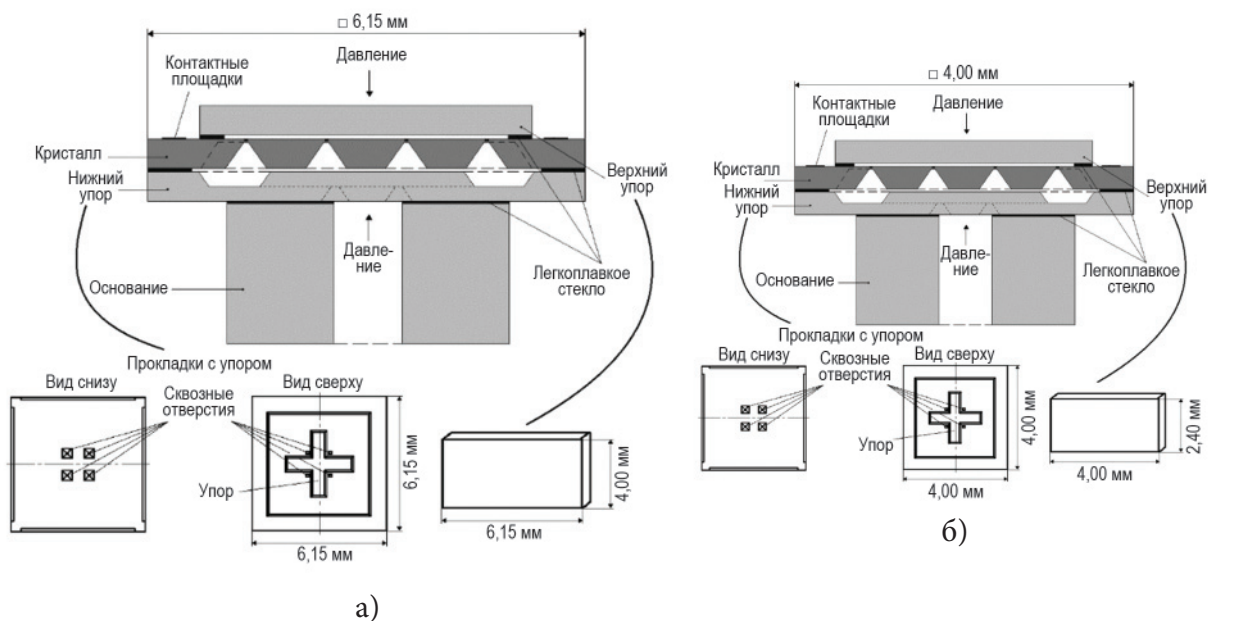


Рис. 5. ТДД ТЖИУ.408854.043. Кремниевая конструкция сборки (а–б) и изменения выходного сигнала от давления (в–г) кристалла ДД для диапазонов до: а) 25 кПа; б) 60 и 160 кПа; в) 25 кПа; г) 60; д) 160 кПа

Таблица 2

Сравнение характеристик ТДД ТЖИУ.408854.026 и -043

Диапазон давления		Предел погрешности	до 25 кПа		до 60 кПа		до 160 кПа	
ТЖИУ.408854...			026	043	026	043	026	043
Кристалл ДД			ИПД52			ИПД60		
Давление-разрушение	с обр. стор. кр., МПа	–	0,3	1,5	0,9	2,9	1,2	3,2
	с лиц. стор. кр., МПа	–	0,3	2,7	1,1	3,9	1,6	4,8
Давление-посадка	с обр. стор. кр., кПа	–	–	80 ± 40	–	240 ± 80	–	650 ± 250
	с лиц. стор. кр., кПа	–	–	100 ± 40	–	360 ± 80	–	750 ± 250
Кол-во образцов исследовано, шт.		–	> 400	178	> 1600	52	> 3400	45
Процент выхода годных, %		–	23–65	40	44–72	56	37–87	42

### Выводы

Разработка модернизированного ТДД ТЖИУ.408854.043 доказала эффективность использования кристалла ПДШ в качестве ДТ в составе ТДД вместо ранее применяемых аналогов, а также преимущества сборочной конструкции для кристаллов ДД с упорами. По «Решению № Р Т144/238» ТДД ТЖИУ.408854.043 (для диапазона давления до 25 кПа) были переданы для проведения типовых испытаний в составе ДД ТЖИУ.406322.016-20 и -21. На разработанный ТДД были получены патенты на № RU2730890С1 (внедрен в производство по акту № Т0036/056-2020), RU187531U1, RU204992U1 и RU220558U1.

### Список литературы

1. A.V. Tran, X. Zhang, B. Zhu. Mechanical Structural Design of a Piezoresistive Pressure Sensor for Low-Pressure Measurement: A Computational Analysis by Increases in the Sensor Sensitivity – Sensors, vol. 18, No. 7, 2023, 2018.
2. M. Basov, D. Prigodskiy. Investigation of High Sensitivity Piezoresistive Pressure Sensors at Ultra-Low Differential Pressures – IEEE Sens. J., vol. 20, No. 14, pp. 7646–7652, 2020.
3. M. Basov, High sensitive, linear and thermostable pressure sensor utilizing bipolar junction transistor for 5 kPa, Physica Scripta, 96 (2021) 065705.
4. M. Basov, “Pressure Sensor with New Electrical Circuit Utilizing Bipolar Junction Transistor”, IEEE Sensors, Sydney, Australia, 2021.
5. M. Basov, “Ultra-High Sensitivity MEMS Pressure Sensor Utilizing Bipolar Junction Transistor for Pressures Ranging from –1 to 1 kPa”, IEEE Sensors Journal, vol. 21, No. 4, pp. 4357–4364, 2021.
6. M. Basov, D. Prigodskiy. Development of high-sensitivity piezoresistive pressure sensors for –0.5...+0.5 kPa – J. Micromech. Microeng., 30, 105006, 2020.
7. B.M. Wilamowski, J.D. Irwin. The industrial Electronics Handbook. Fundamentals of industrial electronics – Taylor and Francis Group, 2011.
8. M. Basov, Schottky diode temperature sensor for pressure sensor, Sens. Actuators A Phys., 331, 112930, 2021.
9. S.C. Bera, R.V. Singh, V.K. Garg. Temperature behaviour and compensation of Schottky barrier diode – Internat. J. of Electr., 95:5, pp. 457–465, 2008.

## **Интеллектуальный анализ архивных данных с целью выявления правил подавления незначимых сигналов тревоги на СВУ АЭС**

**С.Л. Богомолов**, д.т.н. А.Н. Анохин

АО «Русатом Автоматизированные системы управления» (АО «РАСУ») – Москва, Россия

В работе рассматриваются вопросы снижения информационной нагрузки на оператора АЭС за счет подавления отображения незначимых сигналов тревоги. На основании интеллектуального анализа архивных данных по одной технологической системе АЭС были сформированы правила подавления подобных сигналов тревоги и оценен возможный объем снижения отображаемой сигнализации в результате их применения. Кроме того, были выявлены оптимальные значения параметров использованных алгоритмов.

## **Intelligent Analysis of Archived Data in Order to Identify Insignificant Alarms Suppression Rules at NPP's ULS**

**S.L. Bogomolov**, Dr. A.N. Anokhin

Rusatom Automated Control Systems JSC (RASU JSC) – Moscow, Russia

The paper deals with the issues of reducing the information load on the NPP operator by suppressing the display of insignificant alarms. Based on the intellectual analysis of archived data for one NPP technological system, rules for the alarms suppression were formed and the possible amount of reduction in display alarms because of application these rules was estimated. In addition, optimal values for the parameters of the algorithms used were identified.

В процессе работы на АЭС оператор получает уведомления о возникающих событиях и на их основании выполняет корректирующие действия. Если число получаемых сигналов тревоги в единицу времени становится значительным, повышается риск совершения оператором ошибки [1], что обуславливает актуальность задачи снижения интенсивности поступления сигналов тревоги. В работе представлены результаты решения этой задачи на примере системы продувки-подпитки (СПП) энергоблока АЭС, подробно описанной в [2], и, дополнительно, результаты поиска оптимальных значений параметров, использованных для этого алгоритмов.

На начальном этапе был проведен анализ архивных данных, который показал, что среднее число реализованных событий в сутки (т.е. число сгенерированных сигналов тревоги) на 11% превышает норматив, рекомендуемый стандартом IEC 62682-2014. Это позволяет говорить о том, что оператор АЭС работает в режиме информационной перегрузки.

Далее на основании рассмотрения различных типов отклика оператора на сигналы тревоги был сделан вывод, что существенная часть этих сигналов является потенциально «незначимыми», т.к. эти сигналы исчезли без какого-либо вмешательства оператора [3]. Более того, многие них актуализировались на незначительное время, что позволяет относить их к «дребезжащей сигнализации». Для их подавления был применен метод временной задержки ([4, 5]), в результате чего, по оценке, общее число сигналов тревоги сократилось бы на 44,2%, причем в основном за счет «незначимых» сигналов.

Для дальнейшего снижения объема сигнализации предложено использование известных методов подавления лавинообразной сигнализации.

На множестве сигналов тревоги можно установить отношения, связывающие два или более сигналов, при которых один сигнал в контексте определенной ситуации (или определенного эксплуатационного режима) рассматривается как прямое следствие другого или других сигналов. Такой зависимый сигнал тревоги называется вторичным и в большинстве ситуаций является избыточным, так как его устранение – не самостоятельный процесс, а следствие устранения первичного сигнала.

Выявить такие отношения и их экземпляры (то есть реализации определенного отношения на конкретных сигналах тревоги) можно двумя способами:

- на основе экспертных знаний, когда эксперты сразу формулируют эвристические правила идентификации и подавления избыточных сигналов;
- с помощью интеллектуального анализа архивных данных с последующей интерпретацией результатов экспертами.

Целью интеллектуального анализа архивных данных о срабатывании сигнализации является выявление «паттернов», то есть устойчивых образов (последовательностей) срабатывания сигналов тревоги во времени. Эти «паттерны» анализируются, на их основе формируются правила-кандидаты, которые затем предлагаются эксперту-технологу, подтверждающему и преобразующему их в конкретные правила подавления избыточных сигналов тревоги.

Для выявления паттернов используются ассоциативный и секвенциальный анализы, применение которых для данной задачи детально описано в [6].

Ассоциативный анализ позволяет выявить взаимосвязи сигналов тревоги, возникающих одновременно или в пределах малого промежутка времени. В результате формируются ассоциативные правила вида «если А, то Б», означающие, что вместе с событием А с определенной долей уверенности возникает событие Б.

В качестве алгоритма предлагается использовать Argioi, который де-факто является стандартом для поиска ассоциативных правил. Для применения этого алгоритма временные метки архивных записей были округлены до 1 секунды, а сами архивные данные были разделены на фрагменты продолжительностью 24 часа (что создало аналог транзакций, для которых алгоритм Argioi был разработан). В качестве входных параметров ему передаются:

$S_{мин}$  – минимальная степень уверенности, т.е. вероятность того, что события, указанные в условной части сформированного ассоциативного правила, будут сопровождаться событиями, указанными в его заключительной части;

$S_{мин}$  – минимальная величина «поддержки», т.е. минимальная частота появления одновременно двух или более событий, достаточная, чтобы эти события связывались в ассоциативное правило.

Секвенциальный анализ позволяет выявить часто встречающиеся последовательности следующих друг за другом сигналов тревоги. В результате формируются правила «А, впоследствии Б», означающие, что после события А с определенной долей уверенности возникнет событие Б в пределах допустимого временного интервала.

Для применения секвенциального анализа архивные данные были подготовлены аналогично тому, как они были подготовлены для ассоциативного анализа. В качестве алгоритма был использован алгоритм GSP, так как он в отличие от других алгоритмов позволяет оценить силу взаимосвязи между событиями, то есть насколько быстро возникает событие Б после события А. В качестве входных параметров ему передаются минимальная степень уверенности  $S_{мин}$  искомым правилам взаимосвязи, минимальная величина поддержки  $S_{мин}$ , а также минимальный размер анализируемого окна  $W_{мин}$ , измеряемый в секундах. Выдаваемая информация аналогична информации, выдаваемой по результатам ассоциативного анализа.

Далее из выявленных в результате анализа ассоциативных правил (паттернов) вручную отбираются те, для которых возможны интерпретация (то есть отнесение к одному из известных типов отношений) и формирование правила-кандидата, направляемого эксперту-технологу на дальнейший анализ и подтверждение. Затем осуществляется группировка выбранных правил в категории.

С помощью описанных алгоритмов были проведены ассоциативный и секвенциальный анализы архивных данных по СПП, в результате чего выявлены кандидаты в правила подавления незначимых сигналов тревоги. Эти правила-кандидаты были объединены в категории, результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Выявленные категории подавляемых сигналов тревоги вторичной сигнализации

Категория правил-кандидатов	Пример правила-кандидата
Правила подавления сигналов-последствий	Подавлять сигнал о превышении разницы значений температуры воздуха электродвигателя насоса и температуры воздуха промконтур при наличии сигнала о превышении температуры воздуха электродвигателя насоса
Правила подавления сигналов о нарушении неактуальных уставок	Подавлять сигнал предупредительной уставки при наличии сигнала о нарушении аварийной
Правила подавления сигналов обобщенных неисправностей оборудования при наличии сигналов о частных неисправностях	Подавлять сигнал обобщенной неисправности арматуры при наличии сигнала о неисправности схемы ее управления
Правила подавления последствий отказов средств автоматизации	Подавлять множественные обобщенные неисправности технологического оборудования вследствие отказов модулей автоматизации и каналов связи с датчиками
Правила группировки сигналов, вызванных одной причиной	Подавлять сигналы тревоги о высоком уровне давления на всасе подпитывающих насосов при наличии сигнала тревоги о высоком давлении во всасывающем коллекторе
Правила подавления сигналов для различных режимов работы блока или оборудования	Подавлять сигнал тревоги о превышении тока нагрузки электродвигателя насоса при его включении

Стоит отметить, что проведение ассоциативного анализа позволило выявить правила только из первых пяти указанных категорий, а секвенциальный анализ – дополнительно еще и правила из шестой. Данный факт является логичным, т.к. ассоциативный анализ в конечном счете является частным случаем секвенциального.

Параметры  $S_{мин}$ ,  $C_{мин}$  оказывают существенное влияние на алгоритмы, и их неправильный выбор может исказить результаты анализа. В связи с этим необходимо осуществить поиск оптимальных значений указанных параметров, которые достигаются при максимизации числа выявленных категорий и величины  $P_{кат}$ . Для различных значений  $S_{мин}$  и  $C_{мин}$  была рассчитана доля правил, которые в итоге попали хотя бы в одну из категорий  $P_{кат}$ , а также число этих категорий. Результаты представлены в табл. 2 и 3.

В таблицах  $P_{кат}=0\%$  означает, что правила были выявлены, но они не относятся к указанным категориям, а прочерк означает, что при указанных параметрах правила не были выявлены вообще.

Полученные результаты для ассоциативного анализа показывают, что при  $C_{мин} \leq 0,3$  и  $S_{мин} \leq 14$  было выявлено хотя бы по одному из правил каждой категории, что является хорошим результатом. При этом для  $S_{мин} \geq 5$  значение  $P_{кат}$  весьма велико и составляет более 41%, что говорит о том, что при этом условии аналитическая работа по выявлению потенциально достоверных правил будет менее трудоемка, т.к. число случайных правил (не попавших ни в одну из категорий) будет снижено.



Таблица 2

## Результаты проведения ассоциативного анализа

$C_{мин}$	$S_{мин}$									
	2	3	4	5	6	8	10	12	14	15
0,1	6%	9%	27%	41%	47%	54%	57%	55%	52%	50%
0,2	6%	9%	27%	44%	53%	57%	57%	57%	55%	53%
0,3	6%	9%	27%	43%	54%	57%	55%	55%	53%	50%
0,4	5%	8%	26%	44%	52%	55%	53%	53%	50%	50%
0,5	5%	8%	26%	44%	54%	55%	53%	53%	50%	50%
0,6	5%	7%	24%	46%	55%	56%	53%	53%	53%	53%
0,7	7%	7%	25%	52%	61%	62%	62%	62%	62%	62%
0,8	8%	7%	23%	60%	73%	73%	73%	73%	73%	73%
0,9	6%	6%	21%	50%	63%	63%	63%	63%	63%	63%
1	5%	4%	16%	50%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Примечание – цветовая кодировка для числа выявленных категорий:										6, 5, 4, 3, 2, 1, 0

Таблица 3

## Результаты проведения секвенциального анализа

$C_{мин}$	$S_{мин}$									
	2	3	4	5	6	8	10	12	14	15
0,1	10%	20%	29%	35%	37%	40%	42%	44%	55%	55%
0,2	9%	19%	30%	50%	54%	64%	70%	63%	63%	63%
0,3	8%	16%	24%	45%	50%	63%	63%	63%	63%	63%
0,4	7%	16%	24%	50%	56%	71%	71%	71%	71%	71%
0,5	4%	9%	10%	29%	33%	50%	50%	50%	50%	50%
0,6	4%	7%	13%	14%	33%	50%	50%	50%	50%	50%
0,7	7%	–	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0,8	8%	–	0%	0%	–	–	–	–	–	–
0,9	11%	–	–	–	–	–	–	–	–	–
1	11%	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Примечание – цветовая кодировка для числа выявленных категорий:										6, 5, 4, 3, 2, 1, 0

Для секвенциального анализа оптимальным является использование значения  $W_{мин} = 30$ , т.к. при нем правила действительно будут отображать взаимосвязь между сигналами, а не просто случайное совпадение. При значениях  $S_{мин} \leq 10$  и  $C_{мин} = 0,1$  было выявлено хотя бы по одному из правил каждой категории, а высокая доля потенциально достоверных правил ( $P_{кат} \geq 35\%$ ) достигается при  $S_{мин} \geq 5$ . Указанные ранее выявленные оптимальные диапазоны значений величин  $C_{прав}$ ,  $W_{мин}$  и  $S_{мин}$  предлагаются в качестве рекомендуемых при проведении последующих ассоциативного и секвенциального анализов (табл. 4).

Таблица 4

## Оптимальные параметры для ассоциативного и секвенциального анализов

Параметр	Диапазон оптимальных значений	
	Ассоциативный анализ	Секвенциальный анализ
$S_{мин}$	[5 ... 14]	[5 ... 10]
$C_{мин}$	[0,1 ... 0,3]	0,1
$W_{мин}$	–	30

Далее была выполнена оценка того, насколько подавление сигналов тревоги с помощью правил каждой категории позволило бы снизить общий объем сигнализации. В результате было установлено, что применение правил из некоторых категорий (подавление сигналов о нарушении неактуальных уставок, группировка сигналов, вызванных одной причиной) не уменьшило, а наоборот, увеличило бы общее число отображаемых оператору сигналов тревоги из-за многократного подавления и снятия этого подавления.

Но тем не менее, по оценке, применение правил подавления вторичной сигнализации позволило бы снизить общее число сработавших сигналов тревоги на 4,2%. При этом отношение объемов «дребезжащей» и «полезной» сигнализации составило почти 9:10, а отношение объемов «вторичной» и «полезной» сигнализации – около 1:12.

Таким образом, в работе были разработаны и исследованы алгоритмы интеллектуального анализа архивных данных для формирования правил подавления вторичной сигнализации. Разработанные методы были апробированы на примере системы подпитки-продувки АЭС с реактором ВВЭР-1200. Ожидаемое снижение объема сигнализации вследствие применения метода временной задержки и правил подавления вторичной сигнализации составило суммарно 48,4%.

Следующим шагом в развитии настоящей работы является формализация работы экспертов по интерпретации правил-кандидатов, выявляемых в результате интеллектуального анализа данных, а также анкетирование операторов АЭС, нацеленное на оценку достоверности выявленных правил и оценку возможности их применения на реальном энергоблоке.

### Список литературы

1. Swain A.D., Guttman H.E. Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Application (NUREG/CR-1278). – Springfield, VA: National Technical Information Service, 1983.
2. Андрушечко С.А. и др. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта. – М.: ЛОГОС, 2010.
3. Богомолов С.Л., Анохин А.Н. Метод предварительного анализа технологической сигнализации для выявления потенциально незначимых сигналов тревоги // Автоматизированные системы управления технологическими процессами АЭС и ТЭС: Тр. II междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2021. – Минск: БГУИР, 2021. – С. 98–100.
4. Десятников И.И., Ермолаев А.Д., Ракитин И.Д. Повышение качества информационного обеспечения оператора АЭС в аномальных ситуациях // Атомная техника за рубежом. – 1986. – № 7. – С. 15–17.
5. Анохин А.Н., Богомолов С.Л. Метод расчета величины временной задержки для подавления «дребезжащих» сигналов тревоги на АЭС // XIV Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2021): Тр. XIV мультиконференции, Дивноморское, 2021. – Таганрог: ЮФУ, 2021. – С. 116–118.
6. Богомолов С.Л., Анохин А.Н. Исследование эффективности методов и алгоритмов предотвращения избыточной и лавинообразной сигнализации на примере технологической системы АЭС // XII Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2019): Тр. XII мультиконференции, Дивноморское, 2019. – Таганрог: ЮФУ, 2019. – Т. 1. – С. 155–157.

## Разработка системы управления тиристорными агрегатами кипящего стенда

**П.С. Бондарь**, к.т.н. А.О. Толоконский

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ – Москва, Россия

В статье отражены процесс разработки и внедрения программного обеспечения алгоритмов управления тиристорных агрегатов кипящего стенда КС НИЦ «Курчатовский институт». В материале рассматривается общее назначение кипящего стенда, работа тиристорных агрегатов и нагрев экспериментального участка. Автором были изучены устройство тиристорных агрегатов кипящего стенда, система управления нагревом и алгоблочное программирование среднего уровня, на котором базируется система управления. На основании полученных данных было разработано программное обеспечение для системы управления нагревателями с целью оптимизации управления нагревом, задания мощности и контроля выходных токов.

## Boiling Stand Thyristor Units Control System Development

**P.S. Bondar**, PhD A.O. Tolokonskiy

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute) – Moscow, Russia

The article reflects the development and introduction of thyristor units control system of NRC «Kurchatov Institute» Boiling stand. The general appointment of the Boiling stand, thyristor units functioning, and the experimental part heating are also reviewed. Thyristor units device, heating control system and middle algorithmblock-programming tool as base of the control system are examined by author. Using the received data, the heating control system software is developed for more optimal heating control, power setting and output currents measuring.

На кипящем стенде КС со времени его пуска в 1967 году непрерывно ведутся эксперименты, в которых исследуются различные модели и сборки ТВС водо-водяных реакторов, в результате чего определяются гидравлическое сопротивление, кризис теплоотдачи при кипении, устойчивость принудительной и естественной циркуляции теплоносителя, поперечное перемешивание теплоносителя, интенсификация теплообмена за счёт использования решёток-интенсификаторов, понижение теплотехнических запасов из-за локальных нарушений геометрии топливной сборки. Эти исследования необходимы для обоснования теплотехнических запасов активных зон реакторов и оптимизации конструкций тепловыделяющих сборок (далее – ТВС) реакторов.

Система электронагрева моделей ТВС подготавливается к подаче электрического тока на экспериментальный пучок модели ТВС, входящий в состав первого контура кипящего стенда. Вход в кризисное состояние поверхности трубок модели ТВС осуществляется плавным повышением электрической мощности, подаваемой на модель ТВС.

За работу электронагревателя первого контура циркуляции в составе кипящего стенда и подачу мощности на участок экспериментальной установки отвечают тиристорные агрегаты. Преобразовательная подстанция состоит из четырех управляемых тиристорных выпрямителей, выходная мощность каждого из которых равна 2500 кВт. Для того чтобы гарантировать плав-



ное нарастание мощности и оптимальную работу тиристорных агрегатов по выходному току и выдаваемой мощности, необходимо внедрить в АСУ ТП стенда программное обеспечение алгоритмов управления тиристорными агрегатами, обеспечивающее сведение токов, идущих через тиристоры, уменьшение биений и взаимное регулирование токов по всем агрегатам [1].

Для нормальной эксплуатации кипящего стенда КС необходимо, чтобы рассогласование токов между двумя шкафами одного тиристорного агрегата не превышало 500 А, а дребезг и выбросы отдельных токов не превышал 50 А на всём диапазоне мощности, равном 5 МВт при работе всех четырёх тиристорных агрегатов [2].

АСУ ТП кипящего стенда КС построена с использованием SCADA-системы из программно-технического комплекса «УМИКОН» и содержит в себе автоматизированные рабочие места научных сотрудников, человеко-машинный интерфейс с выводом параметров экспериментальной установки, программную часть (программное обеспечение, алгоритмы управления верхнего и среднего уровня, мнемосхемы, база данных реального времени, архивы данных) и аппаратную часть (персональные компьютеры, станции сбора данных, серверы, модули центрального процессора, модули среднего и нижнего уровня, силовое оборудование) [3]. На рис. 1 показано подключение модулей нижнего и среднего уровней для связи с АРМ и организации управления тиристорными агрегатами.

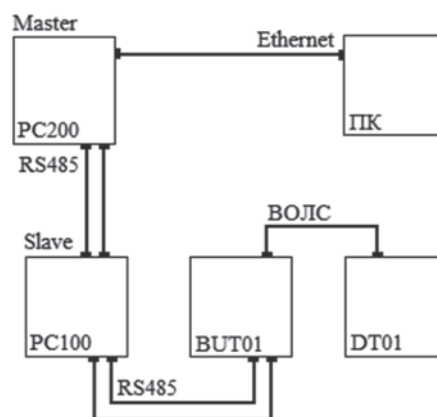


Рис. 1. Структура управления и сбора данных тиристорных агрегатов

Модуль центрального процессора PC200 представляет собой функционально законченную, адаптированную к промышленным условиям PC-совместимую ПЭВМ с расширенной поддержкой гальванически развязанных внешних интерфейсов. Модуль PC100 предназначен для организации связи и взаимодействия с модулями ввода-вывода и ПЭВМ, а также для выполнения вычислений, обработки сигналов ввода-вывода, поддержки распределенных сетей и т.п. Модуль БУТ01 предназначен для управления трёхфазным, полностью контролируемым мостовым выпрямителем. Используется совместно с модулем ДТ 01. Модуль ДТ01 предназначен для размножения импульса поджига на 8 тиристоров типа Т143-500.

В персональном компьютере функционирует база данных реального времени – программа MWBridge, включающая в себя базы данных реального времени и алгоблочное программирование верхнего и среднего уровня [4, 5].

Программирование среднего уровня производится в модуле центрального процессора PC100, управляющие команды из которого поступают в модуль управления тиристорами БУТ01 по интерфейсу RS-485.

Ниже приведено описание алгоритма. На рис. 2 показаны начальные алгоблоки программы – служебный алгоблок, алгоблоки задания для выбора источника управления мощностью, алгоблоки аналоговых значений с выбранного источника управления мощностью.

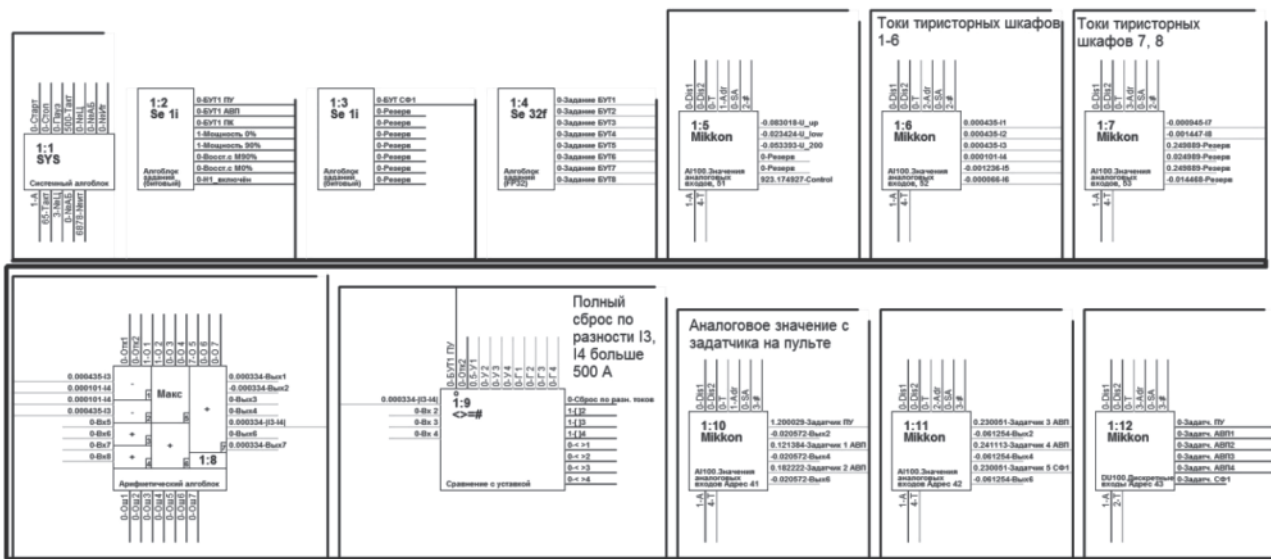


Рис. 2. Начальные алгоблоки программы

Алгоблок задания источника управления мощностью позволяет переключаться между несколькими задатчиками мощности, расположенными в пунктах управления технологическим процессом кипящего стенда. Алгоблок «Сравнение с уставкой» формирует сигнал на блоки аварийной защиты (БАЗ) при разнице между значениями токов со шкафов одного тиристорного агрегата более 500 А. Алгоблоки аналоговых модулей АП100 передают данные с выбранного задатчика мощности, поступающие на вход данных модулей, на следующие алгоблоки программы для дальнейшего преобразования.

Логические алгоблоки служат для преобразования сигналов с датчиков тепловых параметров в дискретные логические сигналы частичного и полного сброса мощности. Алгоблоки-селекторы необходимы для выбора одного из четырёх аналоговых значений с датчиков мощности в зависимости от выбранного задатчика.

На рис. 3 показаны арифметические алгоблоки для расчёта аналогового значения, передаваемого на алгоблоки модулей БУТ.

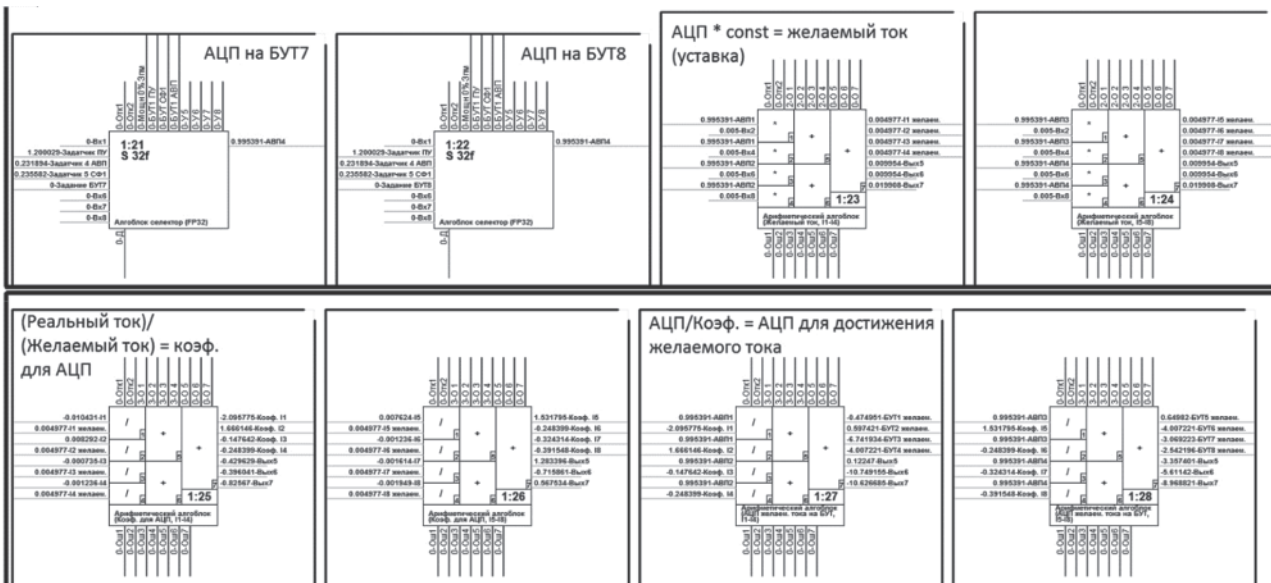


Рис. 3. Арифметические алгоблоки для расчёта коэффициента токов

Как видно на рис. 3, желаемый ток (эталонное значение) является аналоговым значением с датчика мощности, помноженным на постоянный коэффициент. В ходе работы реальные значения токов с тиристорных шкафов делятся на эталонные значения, и полученный в результате коэффициент используется для преобразования аналогового значения с датчика мощности в сигнал для модулей БУТ на открытие тиристорных шкафов так, чтобы токи каждого тиристорного шкафа были одинаковы.

При отладке системы выяснилось, что постоянный мультипликативный коэффициент аналогового значения датчика мощности вызывает сильный дребезг токов из-за их расхождения с параметрами тиристорных агрегатов. Был проведён анализ зависимости напряжения на нагревательном элементе от угла открытия тиристорных шкафов

Формула для расчёта напряжения нагревательных элементов:

$$U_{нагр} = U_d \cdot \cos \frac{\pi \cdot \alpha}{180^\circ}, \tag{1}$$

$$U_{нагр} = U_d \cdot \left( 1 + \cos \frac{61\pi \cdot \alpha}{180^\circ} \right), \tag{2}$$

где  $U_{нагр}$  – напряжение нагревательных элементов,  $U_d$  – предельное напряжение заданной ступени нагревателя,  $\alpha$  – угол открытия тиристорных шкафов (в градусах).

Формула (1) актуальна для угла открытия тиристорных шкафов от 0 до 60 градусов, формула (2) актуальна для угла от 61 до 120 градусов.

В арифметических алгоблоках вычисляется значение аналогового параметра с датчика мощности при условии срабатывания сигнала частичного либо полного сброса. Далее результат вычислений идёт в алгоблок БУТ для передачи данного параметра в модуль управления тиристорными шкавами. В соответствии с данным значением тиристорные шкафы открываются на определённый угол.

Такт работы программы составляет 50 мс, что достаточно для системы управления тиристорными агрегатами. Задание значения мощности нагревателя происходит с высокой частотой обновления, что позволяет задавать мощность плавно. На рис. 4 представлен график зависимости изменения значений выходных токов от времени при росте мощности нагревателя.

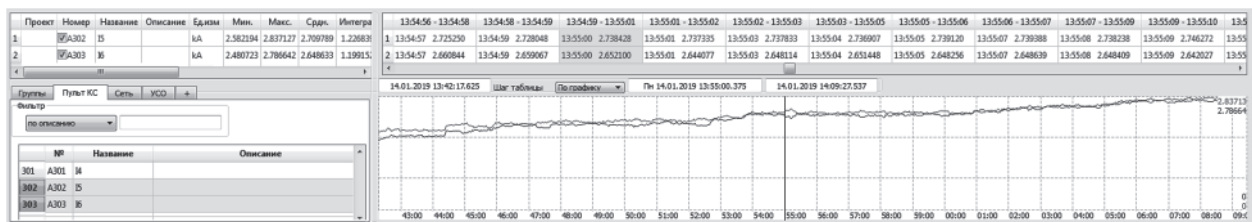


Рис. 4. График зависимости изменения значений выходных токов от времени

Рассогласование между токами одного агрегата не превысило 10 А, отклонение токов от ожидаемых величин и выбросы токов также не вышли за пределы 10 А. Рассогласование токов разных тиристорных агрегатов составило в максимуме не более 30 А.

Минусом программы является сильная неустойчивость системы при подключении всех четырёх тиристорных агрегатов. При включении одновременно четырёх агрегатов при достижении значений 4 кА на один шкаф имели место сильные скачки, флуктуации и дребезг токов всех тиристорных шкафов, достигающие амплитуды в 1–1,5 кА.

Данная система оптимальна для экспериментов с умеренным нагревом рабочего участка кипящего стенда с мощностью нагревателей не более 3 МВт. В ходе дальнейшей работы для реализации сведения токов тиристорных шкафов к эталонному значению при мощности нагревателей, доходящей до максимума в 5 МВт, планируется внедрить в алгоритм ПИИ-регуляторы для корректировки аналогового значения с задатчика мощности и его преобразования в угол открытия тиристоров через модули БУТ.

### Список литературы

1. Лебедев В.О., Власов В.А., Обносов А.В., Толоконский А.О. Разработка системы технологического программирования на основе системно-ориентированного подхода для распределенных АСУ ТП на базе ПТК УМИКОН и опыт ее внедрения на объектах атомной промышленности // Ядерные измерительно-информационные технологии. – 2009. – №2. – С. 67–77.
2. Ковалев Ф.И., Мосткова Г.П. Полупроводниковые выпрямители. – Энергия, 1967. – 478 с.
3. Лебедев В.О. Об оптимальной структуре комплекса технических средств АСУ ТП // Автоматизация в промышленности. – 2013. – №7. – С. 64–67.
4. Лебедев В.О. Руководство пользователя MWBridge MLB. 2020 г.
5. Paluh B.V., Vetrov A.N., Egereva I.A., Kozlova Yu.G. The information system of evolution control of multistage processes of production and technical systems in fuzzy dynamic environments, Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем. – 2017. – №7. – С. 301–304.

## **Информационно-аналитическая система верификации технической документации оборудования ТПТС: функция автоматизированного отслеживания и внесения изменений и функция верификации проектных данных**

**Л.Ю. Бунатян**

ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова» – Москва, Россия

Системы цифровой аналитики на предприятии позволяют выявлять несоответствия документации на изготовление оборудования на ранних этапах. Представляемые алгоритмы анализа могут быть интегрированы в различные автоматизированные системы управления производством. Автором разработана классификация требований к исходным данным, позволяющая автоматизированно поддерживать безошибочность проектной документации. Интерактивный интерфейс для работы с изменениями позволяет пользователю наглядно видеть, какие внесены изменения и автоматизированно выборочно подгружать часть информации из внешней несвязанной базы данных схожей структуры в проектную базу данных.

## **Information-analytical System for Verification of Technical Documentation of TPTS Equipment: Automated Tracking and Change Function and Design Data Verification Function**

**L.Yu. Bunatyan**

FSUE Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA) – Moscow, Russia

Digital analytics systems at the enterprise make it possible to identify inconsistencies in equipment development documentation at an early stage. Provided analysis algorithms can be integrated into various automated production control systems. The author has developed a classification of requirements for initial data, which allows to automatically maintain the accuracy of project documentation. An interactive interface for working with changes allows the user to visually see what changes have been made and automatically selectively load some of the information from an external unrelated database of a similar structure into the project database.

В изготовлении оборудования для больших управляющих систем задействовано значительное количество людей из нескольких организаций, разрабатывающих и дополняющих на различных этапах большие объемы проектных данных. Большая часть проектной информации находится в базах данных, содержащих таблицы с параметрами оборудования. В процессе разработки производится множество корректировок. К сожалению, в связи с большим количеством изменяемых параметров, в проектных организациях часто допускаются ошибки. Приходится переделывать значительный объем.

Актуальность и важность систем цифровой аналитики на предприятии значительна. Внедрение подобных систем позволяет выявлять несоответствия в документации на изготовление оборудования на ранних этапах. Это приводит к сокращению объемов корректировок, снижению трудоемкости. Позволяет значительно повысить качество проектных работ и готовых



изделий. Для обеспечения корректности проектных данных требуется регулярно проверять и синхронизировать их, но вручную это было бы слишком сложно.

Представленные здесь алгоритмы обработки данных прошли многочисленные оптимизации и показали наибольшую эффективность. Акцент в статье сделан на описании способов обработки данных. Многие подходы разработаны автором и не имеют аналогов в ранее разработанных системах. Разработки были начаты автором в 2002 году, в настоящее время функционал значительно расширен и оптимизирован. Критерии требований выставлялись на основе многолетнего опыта в верификации проектных данных и в автоматизации обработки данных.

Одна из значимых функций системы – аналитическая модель, позволяющая оперативно выявлять несоответствия проектной информации. Система организована с применением множества SQL-запросов. Составлены и классифицированы возможные типы несоответствий, сформулированы условия их автоматизированного выявления. Набор критериев проверок, по которым составлялся перечень, основан на описании взаимосвязей параметров. Он переведен на язык условных логических конструкций «если ... – то ...». Если в одном из полей имеются такие-то данные, то «должно быть заполнено такое-то поле», «для заполнения подходят такие-то параметры», «требования к остальным записям, чтобы исключить возможные противоречия такие-то» и другие условия. Есть возможность пакетного запуска групп проверок по областям.

Проводятся проверки на:

- 1) отсутствие информации; несоблюдение формата проектных данных;
- 2) несоответствия технического характера; противоречия между полями либо записями таблиц; несоблюдение смысловых требований к параметрам;
- 3) несоответствия возможностям применяемой аппаратуры либо требованиям для текущего объекта; настройки связи с текущими каталогами типовых решений и прочей проектнозависимой информацией;
- 4) противоречия между информацией в отдельных документах. Здесь требуется синхронизация либо автоматизированный выпуск документации.

Рассмотрим функционал синхронизации более подробно. Данные алгоритмы оказались очень важны в работе, автоматизация процессов синхронизации обеспечила громадный рост продуктивности.

Важной функцией является интерактивная синхронизация таблиц базы данных. Представленная методика применяется в случаях, когда требуется выборочно подгрузить в проект часть информации из внешней несвязанной базы данных схожей структуры. Может также применяться при необходимости собрать из нескольких рабочих баз одну актуальную, при одновременной несетевой работе над проектом нескольких людей, при отмене части изменений в проекте (при наличии резервной копии таблицы), анализе произведенных пользователем изменений.

Ручной способ отслеживания и внесения изменений слишком трудоемкий. Полностью автоматический способ не подошел тоже, регулярно требовалось контролировать вносимую информацию. Требовалось найти разумный компромисс, баланс между автоматической и ручной обработкой.

Синхронизация выполняется для пар таблиц, одна из которых сначала была копией другой. Далее в обе таблицы независимо могли быть внесены изменения содержимого полей, добавлены, переименованы, удалены записи. Могли добавиться либо быть переименованы поля в таблицах.

Перед началом работы программа сравнивает структуры двух обрабатываемых таблиц и анализирует, смогут ли данные из второй таблицы поместиться в структуру первой таблицы без потерь. Уточняется количество синхронизируемых полей. Если требуется, количество, тип и размер полей результирующей таблицы автоматически корректируются, чтобы не потерять информацию, подгружаемую из второй таблицы.

Для синхронизации количества и содержимого записей требуется наличие ключевых полей. Поскольку идет работа с произвольной структурой таблиц, выполняющие эту роль поля в структуре базы данных могут не иметь прописанный статус «ключевые», их уникальность

проверяется программно. Обнаруженные изменения по дублирующим записям далее просто выносятся из общего перечня в отдельную таблицу, поскольку автоматическая корректировка при дублировании невозможна.

На втором этапе синхронизируется количество записей, связь осуществляется по основным ключевым полям. Новые записи добавляются. Удаляемым присваивается статус «удаленные» в специальном поле, непосредственное удаление записей не производится для возможности отмены изменений. История изменений протоколируется.

Существует также режим отслеживания переименований. При этом попавшие в списки «удалено/добавлено» записи дополнительно связываются по второй ключевой комбинации, поля которой могут не соответствовать требованиям уникальности. Здесь важно, что на этом этапе участвуют не все записи. Такой анализ возможен только благодаря тому, что исключаются записи, совпавшие ранее по основной ключевой комбинации, что заметно сокращает размер массива данных и снижает вероятность дублирования среди оставшихся записей. Далее требуется визуальный контроль и окончательное подтверждение от пользователя.

На третьем этапе анализа используется интерактивный интерфейс (рис. 1). Для совпавших по основным ключевым полям записям, включая переименованные, создаются перечни изменений содержимого по всем одноименным полям обеих таблиц.

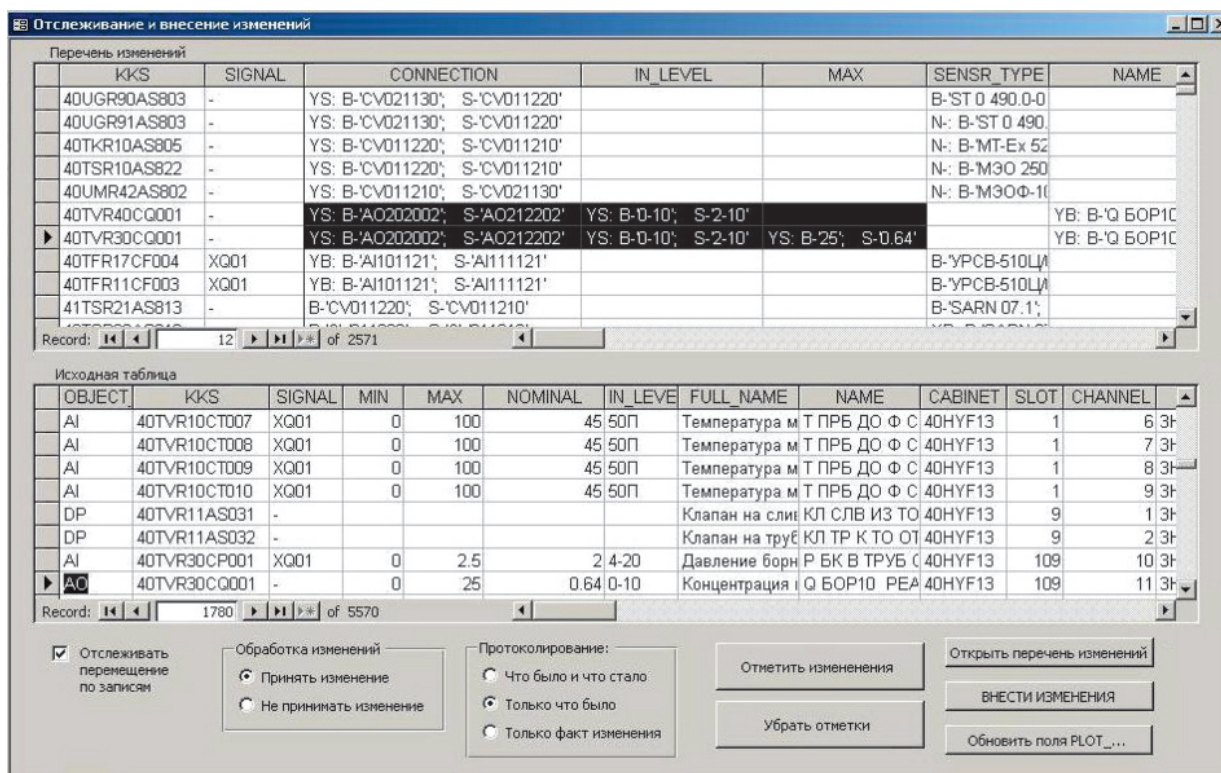


Рис. 1. Интерактивный интерфейс процедуры внесения изменений

В верхней части данной формы представлена таблица, в которой в сгруппированном виде представлены все изменения полей по каждой из измененных записей. Формат записи: «В-"что было", S-"что стало"». При этом видно сразу всю историю изменения по каждой записи. Такой формат содержит всю необходимую пользователю информацию, не загромождая интерфейс. Группировка производится с использованием перекрестного запроса для таблицы с перечнем изменений.

В нижней части формы приведена рабочая таблица, в которую планируется вносить изменения. Если поставить курсор на какую-либо запись верхней таблицы, курсор нижней автоматически переводится на ту же самую запись. Это обеспечивает наглядность, т.к. одновременно на экране видна вся информация по данной записи. До реализации данной функции в спорных



моментах приходилось регулярно открывать данную таблицу в отдельном окне и искать в ней нужные записи. Представленная здесь реализация позволяет быстро получать необходимую в процессе работы информацию.

Перечни отображаемых на форме полей автоматически подстраиваются под произвольную структуру исходных таблиц. Это реализовано за счет того, что структура формы (перечень и количество ячеек) перед отображением создается на каркасе шаблона формы программно. Постоянными являются только обеспечивающие уникальность ключевые поля.

Поскольку это по сути не таблица, а группа программных ячеек, к ячейкам привязан набор свойств, позволяющих отслеживать факт выделения записей. При поднесении курсора мыши к определенным зонам записываются параметры выделенных ячеек, что позволяет сохранить информацию о выделенных ячейках до того, как фокус выделения передается на кнопку «Отметить изменения», запускающую обработку.

В формах учтена возможность изменения порядка столбцов (путем перетаскивания мышью), можно ставить фильтры, менять сортировку.

Чтобы принять или отклонить изменения, нужно сначала выбрать тип требуемого действия (на нижней части формы в разделах «Обработка изменений» и «Протоколирование»). Затем на верхней табличной форме выделить требуемую часть ячеек и столбцов (с помощью мыши либо клавиатуры) и мышью нажать на кнопку «Отметить изменения».

Перед данным изменением появится соответствующая отметка в специальном формате, где первый символ – принимать или нет данное изменение («Y» / «N»), второй символ – тип протоколирования в изменяемой таблице. После окончания разметки данных нужно нажать на кнопку, и все выбранные изменения будут автоматически внесены в рабочую таблицу.

В результате автоматически получаем перечни выбранных и внесенных изменений в определенном формате. На основании синтаксиса данных перечней возможно автоматизированное обновление отдельной связанной с данными изменениями документации.

Например, доступна автоматизированная генерация схем. Для тех систем проектирования графических схем, которые поддерживают рисование элементов с командной строки, можно программно создать последовательность команд для генерации новых либо модификации ранее созданных схем. Метод подходит для схем, наличие графической либо текстовой информации на которых зависит от типовых решений и от информации в базе данных.

Есть функции автоматизированного выпуска документации. Например, для документации в формате Microsoft WORD для этого предварительно создается шаблон будущего документа, содержащий заголовки и постоянный текст. В местах, куда требуется опубликовать информацию, зависящую от базы данных (текстовые надписи либо содержимое таблиц), устанавливаются закладки, (функция меню «Вставка / Закладка»). Далее программа вычисляет необходимую информацию, открывает файл, переводит курсор на нужную закладку и публикует туда нужный фрагмент текста.

Также есть возможность проверок элементов документации других форматов данных, например, графических файлов или текстовых документов.

Если графический редактор, например САПР GET-R1, поддерживает выгрузку перечней элементов схем, то на эти массивы данных настраиваются проверочные SQL запросы, обеспечивающие подтверждение соответствия параметров интересующих элементов на схеме и содержимого базы данных.

При необходимости анализа графического формата AutoCAD (\*.dwg) интересующая информация о наличии на схеме элементов и текстовых надписей с координатами извлекается автоматизировано из файлов. При необходимости более сложного анализа отдельный модуль распознает типовые решения, выбирает и записывает в таблицу базы данных интересующую информацию со схем, анализируемую далее.

Представленный подход поддерживает целостность массивов проектной документации, объединяя отдельные этапы работ, и может применяться в различных автоматизированных системах управления производством.

## **Алгоритмы уменьшения количества точек, необходимых для визуального представления трендов исторических данных в СВУ АСУ ТП АЭС**

**Д.А. Гаркавченко**, И.В. Захарин, А.М. Куликов, к.т.н. А.О. Толоконский

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ – Москва, Россия

В работе рассматриваются различные методы понижающей дискретизации исторических данных автоматизированных систем управления для их визуального представления в виде линейных диаграмм. Предложенный алгоритм на основе картографической техники значительно сокращает количество точек данных, но сохраняет важные визуальные характеристики трендов.

## **Algorithms for the Reduction of the Number of Points Required to Represent Historical Data Trends in Upper Level System of I&C NPP**

**D.A. Garkavchenko**, I.V. Zaharin, A.M. Kulikov, PhD A.O. Tolokonskiy

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute) – Moscow, Russia

The article discusses several methods for downsampling historical data of automated control system, to enable visualization by line charts. The algorithm based on cartographical technic significantly reduces the number of points, but retains important visual characteristics of trends.

Представление значений технологических параметров во времени в виде линейных диаграмм, называемых трендами, является неотъемлемой функцией систем верхнего уровня АСУ ТП на базе любой SCADA-системы, так как способствует лучшему пониманию динамики параметров технологического процесса.

Обычно выделяют 2 вида трендов: тренды реального времени – для отслеживания динамики технологического процесса, и исторические – для оценки, анализа технологического процесса на большом интервале.

Как правило, построение линейной диаграммы на компьютере – простая задача. Однако, если визуализируемые данные содержат большое количество точек, значительно превышающее количество пикселей для изображения, то возникают проблемы: итоговый тренд получается сжатым (на одной вертикальной линии отображается множество значений), что затрудняет визуальный анализ. Также требуется большее время на перерисовку тренда при изменении его визуальных параметров (типа линии, масштаба, добавления маркеров). И если исходные данные хранятся централизованно, то требуется большее время для передачи и накладывается большая нагрузка на сеть передачи данных.

Данная проблема актуальна и для СВУ АСУ ТП АЭС на базе ПО ПОРТАЛ, разрабатываемого АО «РАСУ». В архиве СВУ для многих технологических параметров хранится огромное количество значений, так как зоны нечувствительности и апертуры архивирования настроены так, чтобы, в первую очередь, не пропустить изменение параметра при оперативном контроле и управлении. Но при визуальном анализе процесса на длительном интервале многие из этих изменений не нужны, а только усложняют процесс получения, отображения и анализа данных. Поэтому ранее при достижении установленного предела по количеству точек на тренде для уменьшения

их количества применялись «тренды с фиксирование шагом», полученные в результате стробирования. При таком подходе просто выбираются значения параметра через равные промежутки времени. Это является уместным только для относительно «гладких» линий, которые не имеют отклонений. Но локальные экстремумы, а также значительные колебания значений параметров являются очень важными для анализа технологического процесса, поэтому необходим другой метод, уменьшающий количество точек, но сохраняющий визуальные характеристики тренда.

Задача состоит в том, чтобы показать только хранящиеся в архиве СВУ значения параметров с их реальными метками времени, исключив некоторое количество точек, наименее важных для визуального анализа. То есть алгоритм должен возвращать подмножество точек, существующих в исходных данных. Поэтому в данной работе не рассматриваются общеизвестные методы регрессионного анализа, которые, по сути, создают новые точки данных на основе исходных.

Первый рассмотренный алгоритм основан на идее статистического представления данных. Исходные данные разбиваются на примерно равные по количеству точек наборы. Далее для каждого набора выбирается либо точка с самым часто повторяющимся значением ординаты в наборе (мода), либо точка с медианным значением ординаты, либо точка глобального экстремума, если он достигается на интервале. Основной недостаток такого подхода – практически всегда исключаются локальные пики и впадины в каждом наборе, так как учитывается не значение ординаты, а частота ее появления в наборе (рис. 1). При этом часто практически все значения в наборе уникальны, поэтому если в наборе попадают хотя бы две точки с одинаковой ординатой, то выбирается одна из них (рис. 2).

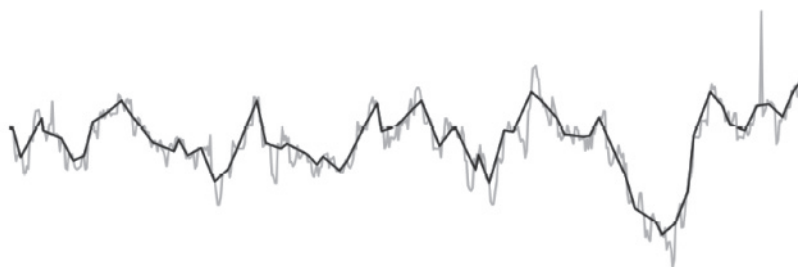


Рис. 1. Результат обработки алгоритмом на основе выбора моды или медианы

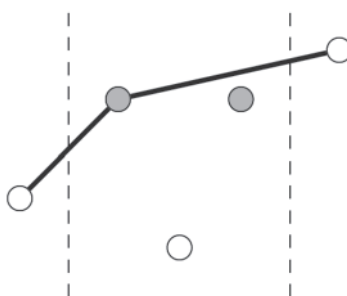


Рис. 2. Демонстрация недостатка алгоритма на основе выбора моды или медианы

Во втором алгоритме для выбора точек используется понятие стандартной ошибки оценки. Обычно этот показатель используется, чтобы оценить, насколько сильно точки исходных данных отклоняются от прямой регрессии [2]. В данном случае прямая регрессии не строится, а заменяется всевозможными отрезками между реальными точками. В начале фиксируются первая и последняя точки исходных данных, остальные точки разбиваются на примерно равные по количеству точек наборы. Для каждого набора вычисляются прямые, соединяющие каждую точку этого набора со всеми точками следующего набора, затем для каждой такой прямой вычисляется стандартная ошибка оценки относительно точек, мимо которых она проходит (рис. 3).

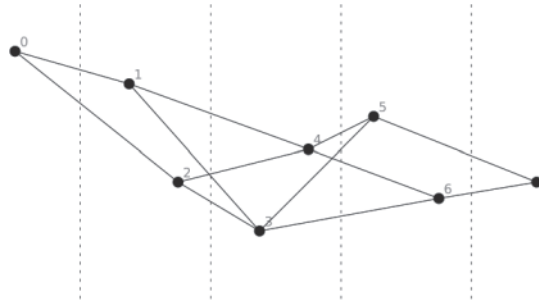


Рис. 3. Пример разбиения 8 точек на 5 наборов

После этого нужно выбрать из каждого набора одну точку так, чтобы сумма стандартных ошибок оценки для отрезков прямых между всеми выбранными точками была минимальной. Данную задачу можно решить разными способами, например, представить ее в виде ориентированного ациклического графа, в котором вершины – это точки исходных данных, ребра – отрезки прямых, а вес ребер – значение стандартной ошибки оценки. Тогда остается решить задачу о кратчайшем пути, которая имеет множество стандартных решений, например, алгоритм Дейкстры [3]. После нахождения кратчайшего пути вершины этого пути возвращаются в качестве искомого подмножества точек исходных данных. Несмотря на то, что в результате работы алгоритма получается статистически наиболее близкая линия к исходной, ее нельзя назвать хорошим визуальным представлением данных (рис. 4), потому что многие локальные пики сглаживаются, так как обычно получается, что сумма стандартных ошибок оценки оказывается меньше, если исключить значительные выбросы.

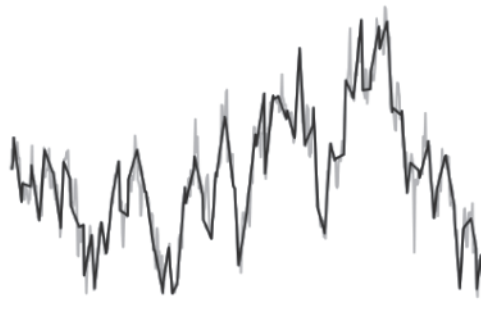


Рис. 4. Результат обработки алгоритмом на основе минимизации суммы стандартных ошибок оценки

Также полученный алгоритм является довольно медленным, но есть и другие способы решения задачи динамической оптимизации, которые, вероятно, могут оказаться быстрее и предпочтительнее, так как для графического представления не обязательно нахождение абсолютной минимальной суммы, возможно, будет достаточно небольшой суммы.

Основной проблемой первых двух алгоритмов является сглаживание локальных пиков, поэтому третий алгоритм основан на идее максимизации длины итоговой линии тренда. Действительно, чем больше локальных пиков охватит итоговая линия, тем больше окажется ее длина. Для этого, как и во втором алгоритме, фиксируются первая и последние точки, остальные точки разбиваются на наборы, вычисляются все отрезки прямых, соединяющие точки одного набора с точками следующего, после этого строится ориентированный ациклический граф, но в данном случае весом ребер являются длины отрезков. Тогда остается решить задачу поиска самого длинного пути. Такая задача решается за линейное время на ориентированных ациклических графах, например, если заменить на противоположный знак весов всех ребер и найти кратчайший путь. Визуально результаты работы алгоритма получаются значительно лучше

предыдущих, большинство локальных пиков и впадин попадают в итоговую выборку (рис. 5), но сам алгоритм получается слишком сложным и неэффективным, поэтому в таком виде не может быть применен в системах верхнего уровня АСУ ТП, так как может оказывать негативное влияние на выполнение других функций СВУ.

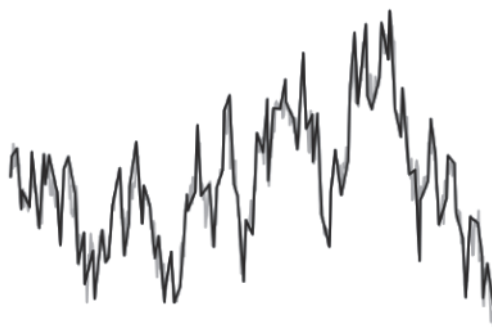


Рис. 5. Результат обработки алгоритмом на основе максимизации длины линии

Во всех описанных выше алгоритмах используется разбиение исходных данных на наборы с примерно одинаковым количеством точек, что является тривиальным только при равномерном распределении точек по оси абсцисс. Но в архиве СВУ АСУ ТП АЭС данные могут располагаться крайне неравномерно, если рассматривать длительный интервал времени, так как запись значений в архив осуществляется по изменению с учетом апертуры, а не циклически, и в разных режимах работы энергоблока параметры технологического процесса могут меняться с разной скоростью и в разных диапазонах. Поэтому вместо попыток упрощения и оптимизации описанных выше алгоритмов был применен другой подход.

Были рассмотрены алгоритмы из области картографической генерализации, где выполняется научно обоснованный отбор и обобщение географических объектов для их отображения на карте. Задача упрощения отображения, например, береговой линии на карте во многом похожа на задачу понижающей дискретизации исторического тренда, только точки тренда расположены строго по возрастанию абсциссы в отличие от точек на карте. Одним из наиболее известных алгоритмов из этой области являются алгоритм Рамера-Дугласа-Пекера [4].

Оригинальный алгоритм Рамера-Дугласа-Пекера получает на вход множество исходных точек и заданное значение  $\varepsilon$ , которое определяет максимальное расстояние между исходной и итоговой линиями. Первая и последняя точки фиксируются, после этого среди оставшихся точек находится наиболее удаленная точка от отрезка, соединяющего первую и последнюю точки. Если расстояние от найденной точки до отрезка меньше заданного  $\varepsilon$ , то алгоритм завершается и все невыбранные ранее точки отбрасываются. Если это расстояние больше, то алгоритм рекурсивно вызывает себя для подмножеств точек от начальной до текущей и от текущей до конечной точки до тех пор, пока все точки не будут выбраны или отброшены. По окончании всех рекурсивных вызовов итоговая линия строится только из тех точек, что были выбраны (рис. 6). В результате итоговая линия охватывает большинство локальных экстремумов, при этом реализация алгоритма достаточно простая и эффективная, и она не требует предварительного разбиения исходных данных на наборы с примерно одинаковым количеством точек.

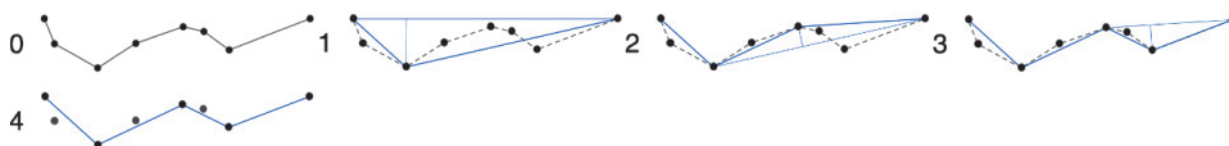


Рис. 6. Демонстрация работы алгоритма Рамера-Дугласа-Пекера



Алгоритм был доработан для практического применения для трендов технологических параметров. Во-первых, для упрощения вычислений вместо расстояния от точки до прямой используется отклонение по вертикали. Во-вторых, нельзя использовать абсолютное значение  $\epsilon$ , так как значения разных технологических параметров изменяются в разных диапазонах, поэтому используется относительное значение  $\epsilon$  от диапазона изменений. В-третьих, в различных режимах работы энергоблока один и тот же технологический параметр может изменяться в разных диапазонах, и для лучшего наблюдения таких параметров на трендах используется логарифмическая шкала. Поэтому, чтобы реализовать возможность понижающей дискретизации в логарифмическом масштабе, исходные данные предварительно разбиваются на наборы, так чтобы в пределах одного набора были точки, отличающиеся по ординате незначительно (не более чем в 100 раз – определено эмпирически), и алгоритм применяется к каждому из наборов отдельно. Также при предварительном разбиении исходных данных учитывается признак качества (достоверности) данных. В-четвертых, в отличие от предыдущих алгоритмов оригинальный алгоритм Рамера-Дугласа-Пекера возвращает заранее неизвестное количество точек, поэтому если итоговое количество точек оказывается больше установленного предела, то алгоритм выполняется заново с увеличенным значением максимального расстояния  $\epsilon$ , количество таких итераций ограничено. Благодаря простоте и эффективности алгоритма его повторение остается незаметным для конечного пользователя системы. Понижающая дискретизация применяется только при достижении установленного предела по количеству точек на тренде и подтверждается пользователем.

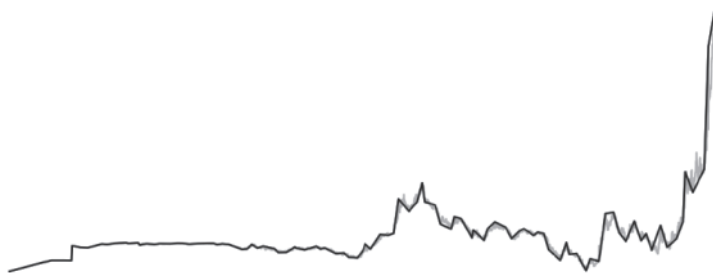


Рис. 7. Результат понижающей дискретизации по алгоритму Рамера-Дугласа-Пекера

Таким образом, на основе алгоритма Рамера-Дугласа-Пекера разработан и реализован в ПО ПОРТАЛ алгоритм понижающей дискретизации, сохраняющий общий вид тренда с его локальными экстремумами при значительном сокращении числа точек. Данный алгоритм проверен для различных наборов данных и уже применяется в системах верхнего уровня АСУ ТП АЭС.

### Список литературы

1. Зверков В.В. Автоматизированная система управления технологическими процессами АЭС / В.В. Зверков. – М.: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2013. – 558 с.
2. Драйпер Н. Прикладной регрессионный анализ. – М.: Статистика, 1973. – 210 с.
3. Алексеев В.Е. Графы и алгоритмы. Структуры данных. Модели вычислений: учебник / В.Е. Алексеев, В.А. Таланов. – М.: БИНОМ, 2012. – 319 с.
4. Douglas D., Peucker T. Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature». The Canadian Cartographer, 1973, 10(2), 112–122.

## Интеллектуализация управления роботом при сверлении

**И.Д. Горбенко**, к.т.н. О.Б. Шагниев

Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого – Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрена задача интеллектуального позиционно-силового управления роботом, выполняющим операции механообработки. Разработана модель «носитель–инструмент–обрабатываемая поверхность», описывающая динамику процессов сверления. Проведено математическое моделирование автоколебательных процессов, возникающих в системе. Разработаны информационно-измерительные и управляющие системы, обеспечивающие детектирование и подавление нежелательных автоколебаний.

## Intellectualization of Robot Control Intellectualization in Drilling

**I.D. Gorbenko**, PhD O.B. Shagniev

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University – Saint-Petersburg, Russia

The problem of intelligent position-force control of a robot performing machining operations is considered. The «robot–tool–surface» model describing the dynamics of drilling processes has been developed. Mathematical modeling of chatter processes occurring in the system is carried out. Control systems have been developed to provide detection and suppression of unwanted oscillations.

### Введение

Актуальность исследований колебательных процессов, возникающих при механообработке, определяется своей практической значимостью: разрабатываемые методы автоматизации и алгоритмы подавления автоколебаний [1–3] позволяют повысить эффективность и безопасность процессов механообработки. На основании гипотезы «резания по следу» были построены различные модели динамики процессов механообработки [4–7]. Однако для описания управления данными процессами и для создания новых алгоритмов подавления требуется разработка новых математических моделей.

### 1. Математическая модель процесса сверления

На основании моделей динамики процессов сверления, используемых в работах [4–7], предложена модель типа «носитель–инструмент–обрабатываемая поверхность» (рис. 1). Рассматривается инструмент, соединенный с носителем через силомоментный датчик, жесткость которого моделируется тремя пружинами и торсионом. На инструмент действуют силы реакции со стороны обрабатываемой поверхности, а носитель снабжен приводами, развивающими необходимые для управления усилия.

В расчетной схеме введены следующие обозначения:  $x_s, y_s, z_s, \theta_s$  – координаты инструмента,  $x, y, z, \theta$  – координаты носителя;  $F_x, F_y, F_z, F_\theta$  – усилия от привода;  $R_x, R_y, R_z, R_\theta$  – силы реакции со стороны поверхности;  $c_{xs}, c_{ys}, c_{zs}, c_{\theta s}$  – жесткость упругого соединения. Динамика такой системы описывается следующими уравнениями:



$$\begin{aligned}
 \ddot{x} + 2\zeta\omega\dot{x} + \omega^2(x - x_s) &= 0, \\
 \ddot{x}_s + 2\zeta\omega_s\dot{x}_s + \omega_s^2(x_s - x) &= -2k_1b\frac{\omega^2}{c}\left(\frac{k_2}{2\text{tg}\alpha}\Delta x_s + \frac{1}{2\text{tg}\alpha}\Delta y_s\right), \\
 \ddot{y} + 2\zeta\omega\dot{y} + \omega^2(y - y_s) &= 0, \\
 \ddot{y}_s + 2\zeta\omega_s\dot{y}_s + \omega_s^2(y_s - y) &= -2k_1b\frac{\omega^2}{c}\left(-\frac{1}{2\text{tg}\alpha}\Delta x_s + \frac{k_2}{2\text{tg}\alpha}\Delta y_s\right), \\
 \ddot{z} + 2\zeta\omega\dot{z} + \omega^2(z - z_s) &= \frac{\omega^2}{k}F_z, \\
 \ddot{z}_s + 2\zeta\omega_s\dot{z}_s + \omega_s^2(z_s - z) &= -2k_1b\frac{\omega^2}{c}\left(k_3\Delta z_s + \frac{S}{2\pi}k_3\Delta\theta_s\right), \\
 \ddot{\theta} + 2\zeta\omega\dot{\theta} + \omega^2(\theta - \theta_s) &= 0, \\
 \ddot{\theta}_s + 2\zeta\omega_{\theta_s}\dot{\theta}_s + \omega_{\theta_s}^2(\theta_s - \theta) &= -2k_1b\frac{\omega_{\theta_s}^2}{c_{\theta}}\left((1 - k_2)R\Delta z_s + \frac{S}{2\pi}(1 - k_2)R\Delta\theta_s\right),
 \end{aligned} \tag{1}$$

где  $\omega, \omega_s, \omega_{\theta}, \omega_{\theta_s}$  – соответствующие парциальные частоты;  $\zeta$  – коэффициент демпфирования;  $R$  – радиус инструмента;  $\alpha$  – половина угла раствора инструмента;  $S$  – подача инструмента;  $k_1, k_2, k_3$  – режущие коэффициенты;  $b$  – радиальная глубина сверления. В правых частях уравнений содержатся:  $F_z$  – приведенное усилие от привода и силы реакции поверхности, зависящие от смещений инструмента за период прохода режущей кромки –  $\Delta x_s, \Delta y_s, \Delta z_s, \Delta\theta_s$ .

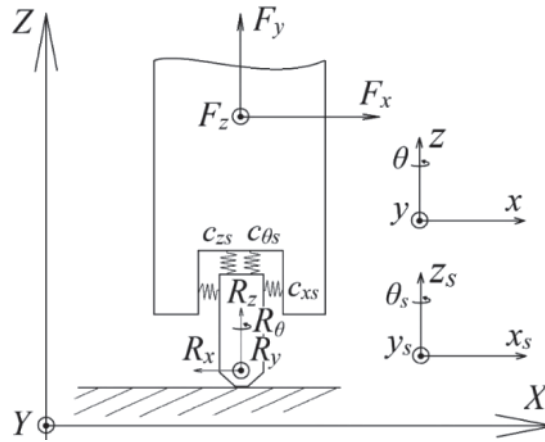


Рис. 1. Расчетная схема системы в режиме контакта

Необходимо также описать усилие, создаваемое приводом носителя. Предполагается, что управление по оси  $Z$  сводится к обеспечению необходимой подачи и осуществляется на основании обратной связи по соответствующей скорости движения. Управляющее воздействие формируется с помощью пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора (PID-регулятора):

$$F_z = k_p e_z + k_i \int_0^t e_z(\tau) dt + k_d \frac{de_z}{dt}; \quad e_z = \dot{z}^d - z. \tag{2}$$

Настройка PID-регулятора производилась при помощи PID-tuner в Matlab. При моделировании колебательных процессов использовались следующие значения параметров и настроек регулятора:  $\omega = 88$  рад/с;  $\omega_s = 335$  рад/с;  $\omega_{\theta} = 200$  рад/с;  $\omega_{\theta_s} = 745$  рад/с;  $k = 1,974 \cdot 10^6$  Н/м;  $k_{\theta} = 780$  Нм/рад;  $k_1 = 1,2 \cdot 10^8$  Н/м<sup>2</sup>;  $k_2 = 0,3$ ;  $k_3 = 2$ ;  $S = 3 \cdot 10^{-4}$  м/об;  $R = 0,006$  м;  $\alpha = \pi/6$ ;  $k_p = 7,2 \cdot 10^4$  Н/мс;  $k_i = 3,2 \cdot 10^6$  Н/мс<sup>2</sup>;  $k_d = 54,3$  Н/м;  $N = 911,7$  1/с<sup>2</sup>.

## 2. Детектирование и подавление колебаний

В настоящей работе рассматриваются методы подавления колебаний на основе коррекции внутренних параметров. Свободно изменяемыми параметрами описанной в первом пункте модели являются подача и скорость вращения шпинделя. Использование подачи как управляемого параметра, однако, затруднено в силу слабой чувствительности устойчивости к изменениям данного параметра. В связи с этим наиболее логичным считается выбор метода подавления на основе скорости вращения шпинделя.

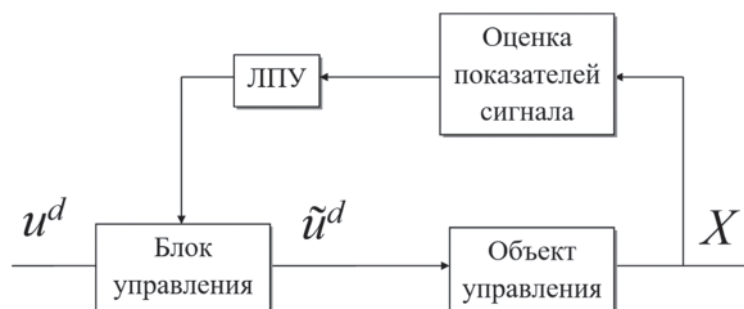


Рис. 2. Структурная схема системы с управлением

В начальный момент времени система обрабатывает заданные параметры сверления  $u^d$ . Как уже было описано выше, между носителем и инструментом находится силомоментный датчик, который после пересчета может возвращать в систему координаты инструмента  $x_s, y_s, z_s, \theta_s$  по обратной связи. Важно отметить, что в силу «перевязки» попарно уравнений в координатах  $X$ – $Y$  и  $Z$ – $\theta$  процессы по ним будут проходить так же попарно одинаково с качественной точки зрения. Это позволяет нам ограничиться в исследовании отслеживанием процессов только по двум координатам, положим,  $Y$  и  $Z$ . Исходя из перечисленных положений предлагается производить детекцию колебаний на основе быстрого преобразования Фурье от координат  $Y$  и  $Z$  с длиной сигнала в 0,1 секунды [3] (оценка показателей сигнала на рис. 2). Далее из амплитудных спектров выбираются  $A_{\max}$  для каждой координаты и сравниваются с  $A_{кр}$  – критическими амплитудами, определяемыми на границе устойчивости. Если условие  $A_{\max} > A_{кр}$  выполняется, логическое переключающее устройство (ЛПУ на рис. 2) сообщает блоку управления (рис. 2) о необходимости коррекции параметров сверления ( $\tilde{i}^d$ ), где последнее и реализуется. В частности, предлагается изменять скорость вращения шпинделя по закону

$$n_i = \begin{cases} n_{i-1} + \lambda, & \text{if } A_{\max} > A_{кр}, \\ n_i, & \text{if } A_{\max} \leq A_{кр}. \end{cases} \quad (3)$$

Для корректной работы данного метода необходимо также определение наиболее устойчивых  $n^*$ , на основе которых можно сделать предположение о знаке  $\lambda$  из условия движения  $n$  к ближайшему  $n^*$ .

Тестирование алгоритма управления проводится для режима потери устойчивости по координатам  $X$ – $Y$  с параметрами  $A_{Yкр} = 1,6 \cdot 10^{-4}$  м;  $n^* = 870$  об/мин;  $z_d = 0,003$  м/с;  $\lambda = 2$ ;  $n = 810$  об/мин. Результаты тестирования представлены на рис. 3–5.

Процесс по координате  $y_s$  показывает рост амплитуды колебаний до второй секунды, вызванный потерей устойчивости. На первой секунде происходит обнаружение автоколебательного процесса и запускается алгоритм коррекции параметров до тех пор, пока не прекратится рост амплитуды и процесс не станет устойчивым. Описанный алгоритм хорошо справляется с потерей устойчивости, однако предполагает изменение параметров сверления. Процесс по координате  $z_s$  соответствует заданному управлению и представляет быстро затухающие колебания, наложенные на прямолинейное равномерное движение.

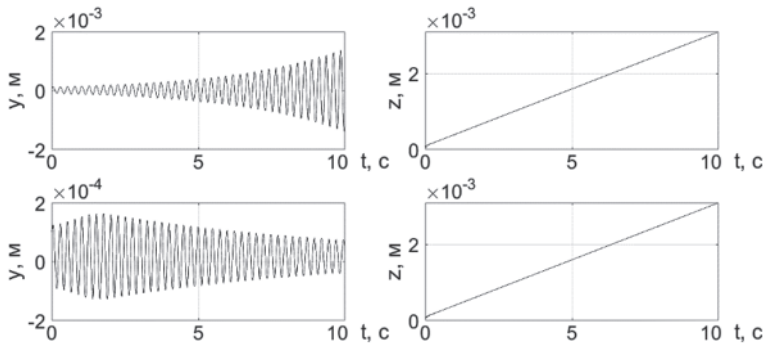


Рис. 3. Координаты  $y_s$  и  $z_s$  без управления (сверху) и с управлением (снизу)

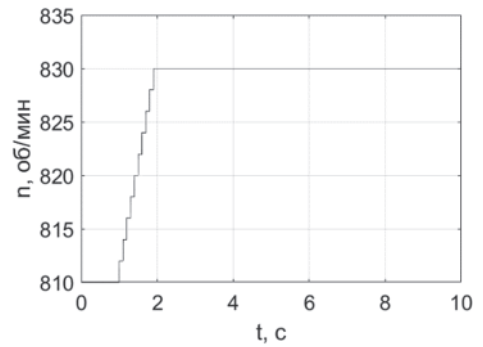


Рис. 4. График изменения скорости вращения шпинделя

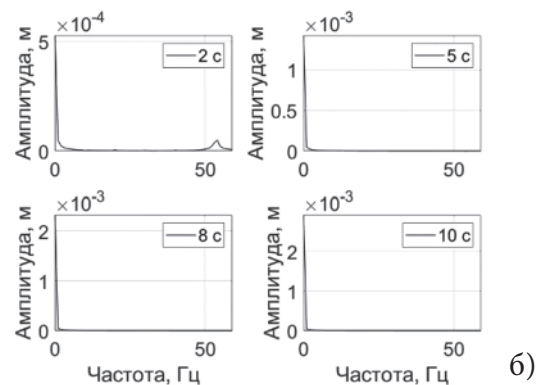
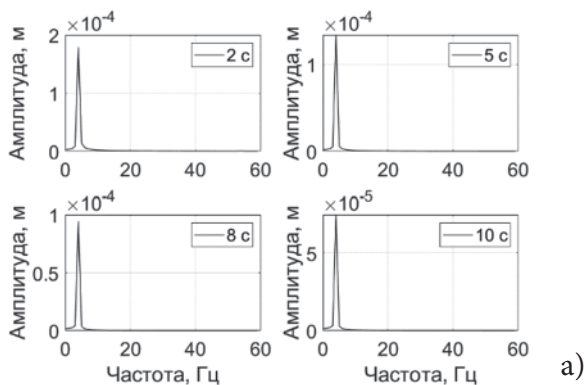


Рис. 5. Эволюции амплитудных спектров координаты  $y_s$  (а) и  $z_s$  (б)

### Заключение

Предложенная двухмассовая модель «носитель–инструмент–обрабатываемая поверхность» позволяет исследовать процессы управления при механообработке. Данная модель может быть использована для разработки алгоритмов позиционно-силового управления и алгоритмов подавления автоколебаний, основанных на подаче внешнего воздействия [8].

### Список литературы

1. Иванов И.И., Воронов С.А. Исследование динамики процесса вибрационного сверления с управлением по размаху колебаний // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2018. – №9 (81).
2. Shanshin I.K., Shagniev O.B., Burdakov S.F. Adaptive self-excited vibrations suppression during milling // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1236. – 012051.
3. Шагниев О.Б., Шаньшин И.К., Бурдаков С.Ф. Управление регенеративными автоколебаниями в процессе фрезерования // Мехатроника. Автоматизация. Управление. – 2019. – №5. – С. 291–298.
4. Roukema, Jochem & Altintas, Yusuf. (2007). Generalized modeling of drilling vibrations. Part I: Time domain model of drilling kinematics, dynamics and hole formation. International Journal of Machine Tools and Manufacture. Vol. 47. P. 1455–1473.
5. Altintas Y. Metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design. 2nd-ed. – Cambridge University press, 2012. – 382 p.
6. Altintas Y., Eynian M., Onozuka H. Identification of dynamic cutting force coefficients and chatter stability with process damping // Annals of the CIRP. – 2008. – Vol. 57. – Iss. 1. – P. 371–74.
7. Tobias S.A. Machine tool vibration. – New York: Wiley, 1961. – 352 p.
8. Байдина Т.А., Шагниев О.Б., Бурдаков С.Ф. Управление вибрационным состоянием робота при силовом взаимодействии с шероховатой поверхностью неопределённого профиля // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – №4. – 2016. – С. 43–52.

## Транспондерная система дистанционного мониторинга защитного контейнера с ядерными материалами

к.т.н. А.А. Бадыгеев <sup>1</sup>, **С.П. Дорохов** <sup>2</sup>, д.т.н. В.А. Козлов <sup>2</sup>, д.т.н. М.П. Кужель <sup>1</sup>,  
Е.П. Пономарева <sup>1</sup>, А.С. Салов <sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» – Саров, Россия;

<sup>2</sup> Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седякова» – Нижний Новгород, Россия

Рассмотрен способ организации дистанционного мониторинга защитных контейнеров с ядерными материалами, основанный на использовании транспондерных систем. Представлена методика технической реализации системы мониторинга состояния защитных контейнеров на основе энергонезависимых транспондеров, осуществляющих идентификацию контролируемого объекта и регистрацию фактов превышения допустимых значений физических воздействий в процессе эксплуатации и хранения защитных контейнеров.

## Transponder System for Remote Monitoring Protective Containers with Nuclear Materials

PhD A.A. Badygeev <sup>1</sup>, **S.P. Dorokhov** <sup>2</sup>, Dr. V.A. Kozlov <sup>2</sup>, Dr. M.P. Kuzhel <sup>1</sup>,  
E.P. Ponomareva <sup>1</sup>, A.S. Salov <sup>2</sup>

<sup>1</sup> FSUE Russian Federal Nuclear Center – Russian Research Institute of Experimental Physics – Sarov, Russia;

<sup>2</sup> Branch of RFNC-VNIIEF "NIIS named after Yu.Ye. Sedakov" – Nizhny Novgorod, Russia

There is examined the way to organize remote monitoring of protective containers with nuclear materials, based on using transponder systems. There is presented a method for technical implementation of the system for monitoring protective containers state based on non-volatile transponders providing identification of a controlled object and registration of exceeding physical influence allowable values during protective containers operation and storage.

### Введение

Важнейшим аспектом борьбы против несанкционированного использования радиоактивных материалов является организация их мониторинга в процессе изготовления, перемещения и хранения. Транспортирование и временное хранение специальных изделий, являющихся потенциально опасным грузом, осуществляется в универсальных защитных контейнерах (ЗК).

Бесконтактный (дистанционный) мониторинг ЗК особенно актуален после аварийных воздействий, когда важны не только оперативность и высокая производительность процессов идентификации и контроля состояния объекта, но и обеспечение безопасности обслуживающего персонала и личного состава аварийно-технических формирований.

В настоящее время одной из проблем при эксплуатации ЗК, содержащих ядерные материалы (ЯМ), является отсутствие информации о физических воздействиях на упаковку в процессе эксплуатации. Перспективным направлением организации мониторинга является разработка бесконтактных систем, в которых вся необходимая информация об объекте и воздействиях на него в процессе эксплуатации считывается дистанционно с энергонезависимого транспондера (ТП), установленного на каждом объекте.

В данной работе рассматривается способ организации дистанционного мониторинга ЗК с ЯМ, основанный на использовании транспондерных систем. Схема организации мониторинга системой дистанционной идентификации и контроля состояния защитного контейнера (СДИК-ЗК) представлена на рис. 1.

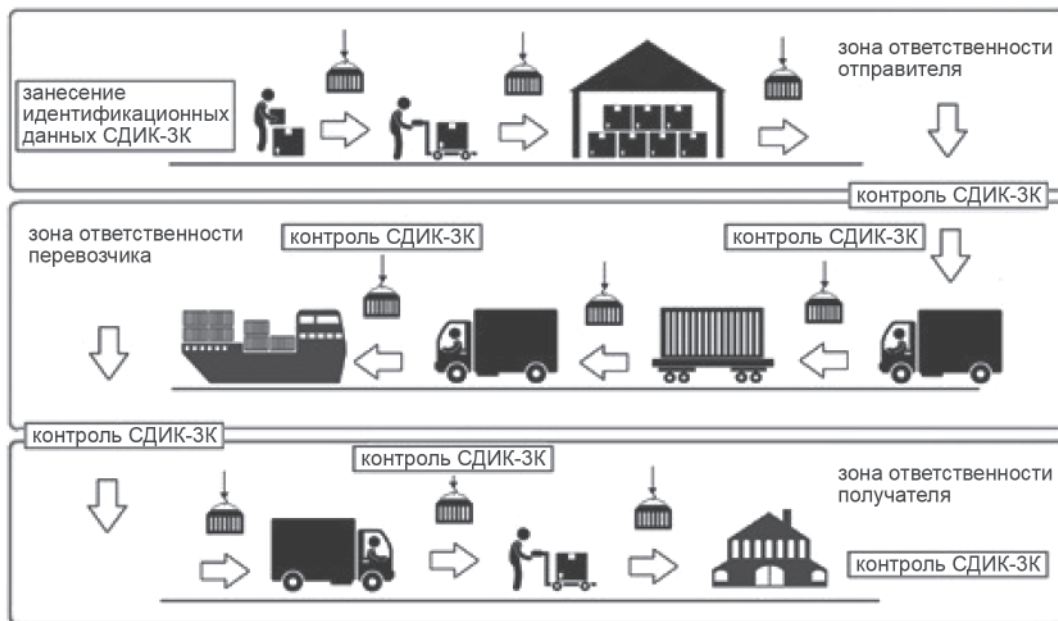


Рис. 1. Схема проведения контрольных и промежуточных опросов ЗК при полном цикле обращения с ними

Идея осуществления мониторинга заключается в том, чтобы каждый контейнер снабдить пассивным устройством (транспондером), обеспечивающим оценку всей совокупности показателей состояния упакованного груза, которое содержит информацию о номере контейнера, целостности системы пломбирования, данные с датчиков контроля физических воздействий. Опрос транспондера осуществляется с помощью специального считывающего устройства, позволяющего получить информацию о реальном состоянии каждого контейнера в данный момент.

### Принцип работы системы мониторинга

Структурная схема системы мониторинга состоит из двух функционально самостоятельных частей: считывающего устройства (базовой станции) и транспондера (рис. 2).



Рис. 2. Структурная схема системы дистанционной идентификации и контроля

Приемо-передающий блок базовой станции по радиоканалу производит опрос транспондера посредством периодической последовательности импульсных сигналов. В ответ на каждый из импульсов запроса транспондер переизлучает уникальную кодовую последовательность

импульсов, идентифицирующую данный транспондер и регистрирующую текущее состояние его датчиков. Принятый базовой станцией ответный сигнал дешифруется блоком обработки, записывается на внутренний носитель информации, выводится на дисплей в виде информации о реальном состоянии каждого контейнера в данный момент.

Среди различных конструктивных исполнений транспондеров особого внимания заслуживают устройства, где в качестве радиометки применяется линия задержки (ЛЗ) на поверхностных акустических волнах (ПАВ) (ПАВ-радиометка), преимущество которой заключается в энергонезависимости и устойчивости к различным дестабилизирующим факторам, таким как воздействие ионизирующих излучений, ударных перегрузок и температурных воздействий в широком диапазоне.

Транспондер [1] представляет собой устройство, содержащее подключенные к ПАВ-радиометке энергонезависимые датчики, позволяющие регистрировать факты превышения допустимых значений физических воздействий и несанкционированного вскрытия с момента установки транспондера системы на предприятии-изготовителе, при его транспортировке и дальнейшем хранении.

В связи с тем, что транспондер на основе ПАВ-радиометки не имеет источников питания (является пассивным элементом), рабочая дальность системы контроля и идентификации ограничивается электрическими характеристиками ПАВ-радиометки и антенны ТП. Дальность действия  $D_P$  определяется с использованием основного уравнения радиолокации [2]:

$$D_P = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \sqrt{K_{BC} \cdot K_{ТП}} \cdot \sqrt[4]{\frac{P_{ПРД}}{P_{ПР.ПРЕД} \cdot m \cdot \sigma_{ЛЗ}}}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – рабочая длина волны;  $K_{BC}$  – коэффициент усиления антенны считывателя;  $K_{ТП}$  – коэффициент усиления антенны ТП;  $P_{ПРД}$  – импульсная мощность, излучаемая передатчиком;  $P_{ПР.ПРЕД}$  – предельная чувствительность приемника;  $\sigma_{ЛЗ}$  – затухание информационного сигнала ПАВ-радиометки;  $m$  – коэффициент различимости, выбранный из условия обеспечения вероятности правильного обнаружения, равной 0,95.

Одним из основных параметров ПАВ-радиометки, позволяющих обеспечить требуемую дальность работы системы, является величина затухания ее информационного сигнала  $\sigma_{ЛЗ}$ , которую можно определить из выражения (1), исходя из необходимого значения дальности идентификации:

$$\sigma_{ЛЗ} = \frac{P_{ПРД} \cdot \lambda^4 \cdot K_{ТП}^2 \cdot K_{BC}^2}{256 \cdot D_P^4 \cdot \pi^4 \cdot P_{ПР.ПРЕД} \cdot m}. \quad (2)$$

### Техническая реализация системы мониторинга на основе энергонезависимых транспондеров

Каждый контейнер [3] оснащается транспондером, который может быть выполнен как в виде внешнего устройства, так и в модульном исполнении. Модульное исполнение транспондера предполагает установку на внешней части контейнера антенны, устойчивой к внешним эксплуатационным и аварийным дестабилизирующим факторам. В данном случае наружная антенна соединяется блоком датчиков, включающим ПАВ-радиометку с подключенными датчиками физических воздействий, посредством кабеля ВЧ (рис. 3). При реализации данной схемы блок датчиков устанавливается внутри контейнера в области контроля заданных физических параметров.

Идентификационный код транспондера соответствует идентификационному номеру устанавливаемой в корпус блока датчиков ПАВ-радиометки, при этом изменение кодированной



последовательности импульсов радиометки невозможно. Формирование информационного сигнала ПАВ-радиометки выполняется посредством установки на поверхности пьезоэлектрической подложки в заданных точках отражательных структур, при этом ПАВ-радиометка выполняет функцию коммутатора информационных сигналов с датчиков физических воздействий: при срабатывании датчика происходит замыкание (или размыкание) соответствующей отражательной структуры ПАВ-радиометки, вследствие чего изменяется коэффициент акустического отражения ПАВ до минимального (или максимального) значения, что обеспечивает амплитудную модуляцию соответствующего импульса [1].

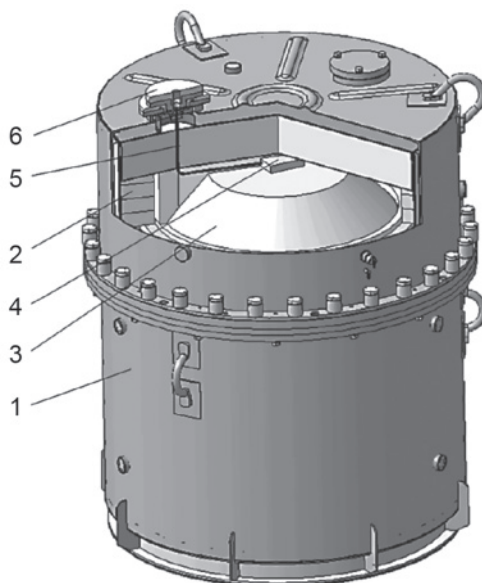


Рис. 3. Защитный контейнер для хранения и транспортирования ЯМ с установленным транспондером:  
1 – корпус контейнера; 2 – элементы защиты от внешних воздействий; 3 – гермообъем контейнера;  
4 – блок датчиков; 5 – кабель ВЧ; 6 – приемно-передающая антенна ТП

### Заключение

Система позволяет решить задачу оперативного дистанционного мониторинга состояния ЗК с ЯМ и обеспечения безопасности обслуживающего персонала при транспортировании и хранении потенциально опасного груза и снизить возможный ущерб, наносимый авариями, при этом конструкция контейнера не требует изменений, массогабаритные параметры увеличиваются незначительно. Реализованная схема построения транспондера исключает вероятность искажения информационных данных. Периодическое считывание информации с транспондера позволяет сделать выводы о фактическом состоянии контейнера и упакованного груза и, при необходимости, принять необходимые меры по осуществлению регламентированных поставочных мероприятий.

### Список литературы

1. С.П. Дорохов. Многопараметрический транспондер на основе пассивной радиометки на поверхностных акустических волнах // Датчики и системы. – 2018. – №11. – С. 35–41.
2. Справочник по радиолокации. Т. 1. Под ред. М. Сколкина. М.: «Сов. радио», 1976 г. – 456 с.
3. Пат. 2715379 РФ, МПК G21F 5/00. Контейнер со средствами защиты и контроля / А.С. Салов, С.П. Дорохов, Р.М. Тагиров, М.П. Кужель, А.А. Бадьгеев, Е.П. Пономарева // Изобретения. Полезные модели. 2020. №6.

## Направления совершенствования систем физической защиты транспортируемых специальных грузов

**Д.И. Егоров**, д.т.н. А.В. Измайлов

АО «ФЦНИВТ «СНПО «Элерон» – Москва, Россия

В современных условиях одной из важнейших задач государства является обеспечение безопасности ядерных материалов (ЯМ) и радиоактивных веществ (РВ) от внешних и внутренних угроз. В докладе рассматривается обеспечение эффективной физической защиты (ФЗ) ЯМ и РВ в процессе их транспортирования. Обсуждаются вопросы, связанные с безопасностью транспортирования ЯМ и РВ между соответствующими стационарными объектами, с учетом специфики данной задачи (ограниченность сил охраны, большие расстояния между объектами, внезапность возможного нападения и т.п.). Рассмотрены вопросы оценки эффективности физической защиты специальных грузов при их транспортировании. Предложены пути совершенствования системы физической защиты транспортируемых специальных грузов.

## Directions of Improvement of Physical Protection Systems of Transported Special Cargoes

**D.I. Egorov**, Dr. A.V. Izmaylov

JSC FCS&HT "SNPO "Eleron" – Moscow, Russia

In modern world one of the most important missions of any state is to ensure security of nuclear materials (NM) and radioactive substances (RS) by protecting them from external and internal threats. This paper discusses an effective physical protection (PP) system for nuclear materials and radioactive substances in the process of transportation. The problems of secure transportation of nuclear materials and radioactive substances between fixed nuclear facilities are discussed in a view of specifics of this mission (limited number of security personnel, long distances between facilities, spontaneous nature of a potential attack etc.). The paper also reviews the issues of evaluation of effectiveness of physical protection of special cargo during transportation. Directions of improvement of physical protection systems of transported special cargoes are proposed.

Обеспечение физической защиты ЯМ и РВ от противоправных действий (хищение, диверсия, террористический акт), в том числе при их транспортировании, наряду с обеспечением ядерной и радиационной безопасности, является весьма актуальной задачей. Все это отражено в международных (МАГАТЭ) [1, 2] и российских [3, 4] нормативных и правовых документах.

По сравнению со стационарными ядерными объектами процесс транспортирования ЯМ и РВ более уязвим в отношении действий потенциальных нарушителей. Следует отметить влияющие на это факторы:

– внезапность возможного нападения нарушителя на транспортные средства, перевозящие специальные грузы;

- использование транспортных средств, перевозящих специальные грузы на дорогах общего пользования и железных дорогах, что не позволяет создать вокруг транспортного средства охраняемые зоны;
- ограниченность численности сил охраны, сопровождающих специальный груз, а также удаленность сил поддержки от места потенциальной атаки;
- прохождение маршрутов транспортных средств со специальным грузом по разным регионам, что увеличивает потенциальную возможность внезапных атак;
- возможность перевеса сил и вооружения нарушителя над силами охраны, сопровождающими груз.

В связи с этим разработка эффективных организационных и технических решений по обеспечению физической защиты транспортируемых специальных грузов представляет собой сложную научно-техническую проблему [5].

Для эффективной физической защиты специальных грузов в процессе транспортирования требуются адекватные силы сопровождения и надлежащим образом оборудованные в инженерно-техническом отношении транспортные средства. Поэтому необходимо модернизировать существующие системы безопасности с использованием современных технологий, преимущественно отечественного производства.

Для обеспечения защищенности перевозимого груза создана и успешно применяется автоматизированная система безопасности транспортирования (АСБТ), разработанная предприятием АО «ФЦНИВТ «СНПО «Элерон».

Под эффективностью системы физической защиты (СФЗ) при транспортировании понимается ее способность предотвращать несанкционированные действия нарушителя по отношению к ЯМ и РВ.

Вероятность предотвращения несанкционированных действий во время транспортирования ядерного материала и радиоактивного вещества может быть представлена как [5]:

$$P = P_{обн} \cdot P_{авто} \cdot P_{пер} \cdot P_{ноб}, \quad (1)$$

где

$P_{обн}$  – вероятность обнаружения действий нарушителя. При внешнем нарушителе вероятность обнаружения стремится к 1;

$P_{авто}$  – вероятность нахождения автомобиля в работоспособном состоянии. Данный показатель является вероятностью безотказной работы автомобильных систем и автомобиля в целом;

$P_{пер}$  – вероятность нахождения персонала в работоспособном состоянии;

$$P_{ноб} = P_{защ} + (1 - P_{защ}) \cdot [P_{защ.раз} + (1 - P_{защ.раз}) \cdot P_{н.сиг} \cdot P_{сил.под}], \quad (2)$$

где

$P_{защ}$  – вероятность нейтрализации нарушителя силами охраны, сопровождающими груз. Данный показатель можно рассчитать имитационно-игровыми методами, используя, например, программный комплекс «Полигон», разработанный АО «ФЦНИВТ СНПО «Элерон»;

$P_{защ.раз}$  – вероятность победы сил охраны, находящихся в автомобиле разведки, над нарушителем. Данный показатель также можно рассчитать имитационно-игровыми методами;

$P_{н.сиг}$  – вероятность получения сигнала диспетчерским пунктом;

$P_{сил.под}$  – вероятность предотвращения несанкционированных действий нарушителя силами поддержки. Предполагается, что с учетом значительной численности сил поддержки, при условии их своевременного прибытия, они одерживают в боестолкновении победу. То есть вероятность того, что  $T_n - T_{сил.под} > 0$ , где

$$T_n = T_{боя\ охр} + T_{преод.физ.бар} + T_{акц} + T_{ухода}, \quad (3)$$

$$T_{сил.под} = T_{пер.сооб} + T_{прин.реш} + T_{движ}. \quad (4)$$

Согласно выражению (2), при стремлении к нулю вероятности получения сигнала ДП вероятность победы над нарушителем принимает вид:

$$P_{\text{поб}} = P_{\text{защ}} + (1 - P_{\text{защ}}) \cdot P_{\text{защ,раз}}. \quad (5)$$

Ввиду ограниченности сил охраны, сопровождающих СГ, и внезапности нападения нарушителя на транспортное средство, вероятность победы над нарушителем крайне мала.

Таким образом, получение тревожного сигнала диспетчерским пунктом от транспортного средства оказывает ключевое влияние на возможность и время прибытия сил поддержки к месту возникновения ЧС и, соответственно, на эффективность физической защиты СГ.

На вероятность передачи информации о точном местоположении ТС на ДП влияют три основных показателя:

- наличие связи «Inmarsat» или «GSM»;
- наличие достоверных данных о местоположении средствами навигационного приемника (сигналы ГЛОНАСС/GPS);
- работоспособность комплекса АСБТ.

Таким образом, показатель  $P_{n.сиг}$  в выражении (2) можно представить как:

$$P_{n.сиг} = P_{\text{работ.к}} \cdot [1 - P_{\text{отс.GSM}} \cdot P_{\text{отс.INM}}] \cdot P_{\text{дост.GPS}} \cdot P_{\text{д.н}}, \quad (6)$$

где

$P_{\text{работ.к}}$  – вероятность нахождения автомобильного комплекса АСБТ в работоспособном состоянии. Данный показатель является вероятностью безотказной работы комплекса АСБТ;

$P_{\text{отс.GSM}}$  – вероятность отсутствия связи по каналу GSM. То есть вероятность нахождения комплекса в данный момент времени вне зоны покрытия оператора сотовой связи GSM;

$$P_{\text{отс.GSM}}(t) = \begin{cases} 0, & \text{при нахождении комплекса в зоне покрытия;} \\ 1, & \text{при нахождении комплекса вне зоны покрытия;} \end{cases}$$

$P_{\text{отс.INM}}$  – вероятность отсутствия связи по каналу Inmarsat. На данный показатель ключевое влияние оказывает время передачи сообщения, если время передачи сообщения близко к времени совершения несанкционированных действий нарушителя, то вероятность стремится к 1;

$P_{\text{дост.GPS}}$  – вероятность наличия достоверных данных о местоположении в ССОИ комплекса АСБТ;

$$P_{\text{дост.GPS}}(t) = \begin{cases} 0, & \text{при недостоверных данных о местоположении;} \\ 1, & \text{при достоверных данных о местоположении;} \end{cases}$$

$P_{\text{д.н}}$  – вероятность готовности диспетчерского пункта принять данные от ТС. В настоящей работе считается, что данный показатель близок к 1.

### Возможные пути модернизации комплекса АСБТ

1) Согласно зависимости вероятности получения сигнала диспетчерским пунктом (6), предлагаются пути совершенствования комплекса АСБТ:

- уменьшение количества функциональных блоков и проводных функциональных связей за счет разработки многофункциональных устройств;
- использование датчиков разного типа обмена информации для резервирования;
- повышение технологичности производства составных частей комплекса;
- использование отечественной элементной базы с максимальными показателями надёжности, с учетом требований импортозамещения;
- транспортирование СГ по маршрутам в зоне покрытия каналов связи;
- своевременное техническое обслуживание, согласно соответствующим регламентам.

2) Для повышения показателя  $P_{авто}$  в выражении (1) предлагается разработка подсистемы контроля состояния автомобиля. Получение информации от информационных систем автомобиля. Данная подсистема необходима для получения полной информации о транспортном средстве с CAN шины автомобиля.

Данная информация необходима для ведения статистики состояния транспортного средства и последующего разбора ситуации при нештатной ситуации. Данные предлагается записывать в постоянное запоминающее устройство комплекса АСБТ.

3) Для повышения показателя  $P_{неп}$  в выражении (1) предлагается внедрение подсистемы контроля состояния водителя. Подсистема контроля состояния водителя предназначена для непрерывного контроля состояния и предотвращения рисков засыпания, потери концентрации внимания водителя автомобильного транспорта.

Подсистема работает по бесконтактному принципу (оптическому) на основе мониторинга движения зрачков, глаз и головы водителя. Подсистема предупреждает водителя об опасности при обнаружении признаков усталости, засыпания или факта отвлечения от дороги при движении транспортного средства посредством звукового сигнала.

Также для сохранности СГ в процессе транспортирования важно контролировать состояние персонала, помимо водителя. Функция мониторинга состояния персонала позволит:

- контролировать готовность и работоспособность персонала, сопровождающего СГ;
- производить поиск внутреннего нарушителя.

Физиологические процессы, подлежащие изучению, и, соответственно, целевые показатели весьма разнообразны, однако большинство исследователей ориентируются на оценку функционирования систем кровообращения и дыхания ввиду их ключевой роли в системной физиологии и высокой информативности таких показателей во многих клинических и экспериментальных ситуациях. Эти показатели могут использоваться для мониторинга состояния персонала. Наибольшее разнообразие физиологических показателей можно регистрировать с помощью локационных методов, термографии и регистрации речи [6].

В данной работе определены направления и конкретные научно-технические решения совершенствования физической защиты специальных грузов.

### Список литературы

1. Конвенция о физической защите ядерных материалов и ядерных установок (с учетом поправки от 2005 г.), МАГАТЭ INFCIRC/274, ратифицированная странами-участницами 8 мая 2016 г.
2. Рекомендации по физической ядерной безопасности, касающиеся физической защиты ядерных материалов и ядерных установок (INFCIRC/225/rev.5), МАГАТЭ, 2013 г.
3. Федеральный закон об использовании атомной энергии, № 170-ФЗ от 20 октября 1995 г. (с дополнениями и изменениями).
4. «Правила физической защиты ядерных материалов, ядерных установок и пунктов хранения ядерных материалов», утв. постановлением Правительства РФ от 19.07.2007 г. №456 (в редакции 2018 г.).
5. Егоров Д.И., Измайлов А.В. Об оценке эффективности физической защиты ядерных материалов и радиоактивных веществ в процессе транспортирования // Научно-технический сборник АО «ФЦНИВТ «СНПО «Элерон». – 2020 г.
6. Вассерман Е.Л., Денисова Д.М., Рудницкий С.Б. Методы дистанционного бесконтактного измерения физиологических показателей человека для диагностики и мониторинга его функционального состояния // Авиакосмическая и экологическая медицина. – 2019. – Т. 53. – №3. – С.20–32.



## **Концепция перехода к машинопонимаемому формату документов по стандартизации и интеграции фонда нормативных документов с автоматизированными информационными системами**

**Т.К. Ерофеева**<sup>1,2</sup>, С.Е. Сбитнев<sup>2</sup>, к.т.н. О.В. Ульянин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ – Москва, Россия;

<sup>2</sup> ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова» – Москва, Россия

В докладе представлены перспективы развития системы стандартизации в части внедрения системы управления нормативной документацией, роли стандартизации в оптимизации процессов жизненного цикла продукции, а также результаты анализа возможности интеграции фонда нормативных документов с автоматизированными информационными системами и системами автоматизированного проектирования (САПР) в рамках создания единого центра нормативно-справочной информации предприятия.

## **A Concept for Transition to a Machine-recognizable Format of Documents on Standardization and Integration of Collection of Regulatory Documents into Computerized Information System**

**T.K. Erofeeva**<sup>1,2</sup>, S.E. Sbitnev<sup>2</sup>, PhD O.V. Ulianin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute) – Moscow, Russia;

<sup>2</sup> FSUE Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA) – Moscow, Russia

The paper describes the future development of the standardization system with regard to implementation of a regulatory documentation management system, the standardization involvement in the improvement on processes of a product life cycle as well as analytical results pertaining to an opportunity to integrate the collection of regulatory documents into computerized information systems and computer-aided design systems (CAD) as part of building a Unified Center of Enterprise's Regulatory Reference Data.

В настоящее время информационные системы стали популярным инструментом для сокращения времени протекания процессов разработки и производства продукции. В основополагающие документы по стандартизации включены дополнительные требования по применению информационных технологий (ИТ), статистических методов анализа, в том числе методов управления рисками при установлении организацией современных методов мониторинга и измерения процессов системы менеджмента качества (СМК). При планировании и документировании функций проверки качества разработки продукции установлены новые дополнительные требования по анализу эффективности применения вычислительных средств и разработанного специального программного обеспечения [1].

Автоматизация процессов (а в дальнейшем – и цифровизация) невозможна без глубокого анализа их текущего состояния для оценки возможности перехода к целевому с соблюдением требований документов по стандартизации (ДС) (как при производстве оборонной продукции, так и продукции гражданского назначения).

При этом следует отметить, что автоматизация процессов с целью их оптимизации должна выполняться параллельно с приведением содержания ДС к современному научно-техническому уровню.



Требования ДС должны охватывать все технические средства и системы ИТ, используемые для целей разработки, производства, сопровождения в эксплуатации и утилизации продукции. Таким образом, можно выделить четыре направления в области стандартизации:

- стандартизация «инструментальных» средств информационной поддержки продукции на всех стадиях жизненного цикла, к которым относятся все автоматизированные и информационные системы;
- стандартизация методов применения технических средств ИТ (автоматизированных и информационных систем) для информационной поддержки продукции на всех этапах жизненного цикла, а также стандартизация процессов, входящих в жизненный цикл продукции, автоматизированных с применением автоматизированных и информационных систем;
- стандартизация электронных документов и иных информационных структур (компьютерные и информационные модели, электронные справочники, «цифровые двойники», базы данных и др.), создаваемых и используемых в процессах жизненного цикла продукции;
- стандартизация терминов и определений в области ИТ, применяемых в документах по стандартизации.

Стандартизация электронных документов и иных информационных структур (информационные модели, «цифровые двойники» и др.), создаваемых и используемых в процессах жизненного цикла продукции, предусматривает разработку требований к:

- электронным техническим документам (конструкторским, технологическим, программным и др.), электронным дубликатам и копиям технических документов;
- электронным организационно-распорядительным документам;
- электронным нормативно-техническим документам;
- прочим (не относящимся к конструкторским, технологическим, программным и другим видам технических документов) электронным документам;
- информационным моделям объектов, компьютерным моделям продукции и компьютерным моделям физических процессов, связанных с продукцией, создаваемых для проведения расчетов, виртуальных экспериментов и виртуальных испытаний;
- электронным процессным моделям;
- прочим информационным структурам (структуры баз данных, информационные объекты и др.), не являющимся электронными документами, создаваемым и используемым для обработки, хранения и передачи информации, внутри и между информационными системами поддержки продукции на всех этапах жизненного цикла [2].

ДС создают единое информационное поле, которое создает основу новой динамично развивающейся цифровой реальности.

Система управления нормативной документацией (СУ НД), создаваемая на ФГУП «ВНИИА», должна обеспечивать минимизацию временных потерь на согласование и утверждение документов, а также повышение контролируемости процессов стандартизации. При этом СУ НД должна обеспечивать интеграцию с используемыми САПР и средствами разработки, автоматизацию проверки ссылочных нормативных документов, автоматизацию учета применимости НД в конструкторской и технологической документации (КД, ТД).

При этом следует отметить, что на ФГУП «ВНИИА» ведутся работы по анализу фонда нормативных документов с целью оценки возможности автоматизации описанных в них процессов. Это требует приведения НД к современному научно-техническому уровню, в частности, для обеспечения легитимности применения электронной технической документации и установления:

- требований к видам и комплектности электронной технической документации;
- правил и технологий создания и оформления электронной технической документации различных видов;

- правил и технологий согласования и утверждения электронной технической документации, её корректировки;
- правил и технологий электронного документооборота, в том числе с использованием электронной подписи и криптографической защиты данных;
- правил и технологий хранения (архивирования) и тиражирования электронной технической документации.

Требования НД должны охватывать все технические средства и системы ИТ, используемые на всех этапах жизненного цикла продукции.

Все преимущества, которые ожидается получить от перевода фонда НД в машинопонимаемый формат, в основном связаны с задачами совершенствования НД, управления фондом НД и доведения НД до пользователей.

Анализ ДС показал, что можно выделить следующие категории информационных объектов, которыми могут быть дополнены (в дальнейшем – заменены) ДС:

- 1 – параметрические твердотельные 3D-модели в формате САПР;
- 2 – электронные КД в формате САПР (2D-чертежи);
- 3 – электронные справочники и базы данных (БД);
- 4 – электронные ТД в формате САПР ТПП (технологической подготовки производства);
- 5 – расчетные программы и библиотеки.

Параметрические 3D-модели в формате САПР могут быть созданы в дополнение к ДС, содержащим конструкции и размеры различных стандартных изделий, инструмента и технологической оснастки. В перспективе такие 3D-модели должны быть выпущены в статусе утвержденного электронного КД, который обеспечит возможность применения 3D-модели при конструировании и возможность изготовления изделий по 3D-модели одновременно.

Электронные КД в формате САПР могут быть выпущены в дополнение к ДС, содержащим самостоятельные приложения в виде комплекта чертежей. Электронные КД могут быть разработаны средствами САПР на основе 3D-модели изделия, описанного в ДС, и размещены для дальнейшего применения в архивах PDM-систем организации. В перспективе планируется создание фонда комплектов электронных КД на основе 3D-моделей, имеющих статус электронных приложений к ДС и используемых для изготовления изделий.

Электронные справочники и БД могут быть созданы в дополнение к ДС, содержащим ограниченные перечни применяемых материалов, стандартных и покупных изделий. Электронные справочники и БД должны быть интегрированы с САПР, PDM-системой, MES-системой, системой закупок материалов (в составе ERP-системы), электронными справочниками стандартных изделий. Электронный справочник материалов и сортаментов играет ключевую роль в системе управления основными данными (MDM), так как является источником данных о материалах в стандартных изделиях, в деталях конструкций изделий, в инструментах и технологической оснастке, в расчете потребности в материалах для производства изделий, в процессе организации закупки материалов для производства изделий. Также электронный справочник материалов и сортаментов должен быть дополнен физическими свойствами материалов и служить источником данных для расчетов стойкости изделий к различным воздействиям на основе 3D-модели изделия.

Электронные ТД в формате САПР ТПП могут быть созданы в дополнение к ДС, содержащим типовые технологические процессы. На базе типовых технологических процессов планируется создание электронной библиотеки, которая будет востребована технологами на этапе ТПП.

Расчетные программы и математические библиотеки функций для использования в вычислительных системах могут быть разработаны в дополнение к ДС, содержащим алгоритмы и

формулы для расчетов, например, расчеты надежности и др. Расчетные программы могут быть разработаны в виде автономного программного обеспечения, а также в виде программ и библиотек для использования в системах высокопроизводительных вычислений или в виде программных модулей, встроенных в другие ИС [3].

Создаваемая на ФГУП «ВНИИА» СУ НД как ядро единого центра нормативно-справочной информации предприятия:

– предоставит полное нормативное обеспечение на этапах разработки и производства продукции за счет интеграции с системами, базами данных и ПО, такими как:

- 1) система планирования;
- 2) система электронного документооборота;
- 3) система управления данными об изделиях (PDM-система);
- 4) система управления жизненным циклом изделий (PLM-система);
- 5) справочники 3D-моделей стандартных и прочих изделий;
- 6) ограничительные перечни, каталоги продукции;
- 7) электронная почта и другие каналы связи;

– обеспечит всем участникам системы стандартизации доступ (с учетом прав) к актуализированному фонду ДС, а также к актуальной информации о всех процессах предприятия [4];

– обеспечит контроль прохождения документов, являющихся результатом различных процессов предприятия.

### Список литературы

1. Киселев В.Д., Овчинников А.А., Агупов В.А. Новые требования государственного заказчика к системам менеджмента качества организаций оборонно-промышленного комплекса // *Материалы научно-практической конференции «Современные требования к организации работ по государственному оборонному заказу при внедрении цифровых технологий и последних изменений в области менеджмента качества, каталогизации и метрологического обеспечения оборонной продукции»*. – Ялта, 2021. – С. 4–20.
2. Ерофеева Т.К., Сбитнев С.Е. Роль стандартизации в оптимизации процессов жизненного цикла продукции // *Материалы научно-практической конференции «Стандартизация оборонной продукции»*. – Ялта, 2021. – С. 119–123.
3. Ерофеева Т.К., Ульянин О.В., Шурукина Ю.И. Перспективы интеграции фонда документов по стандартизации в машиночитаемом формате с системами автоматизированного проектирования и другими информационными системами // *Материалы научно-практической конференции «Стандартизация оборонной продукции»*. – Ялта, 2019. – С. 33–34.
4. Цвирко А.А., Ерофеева Т.К., Пенкин Н.А. Опыт создания информационной системы «Стандартизация ядерной оружейной продукции» // *Материалы научно-практической конференции «Метрология и каталогизация – как основные элементы нормативного, информационного и технического обеспечения системы управления полным жизненным циклом оборонной продукции. Итоги Международного военно-технического форума «Армия-2019» по вопросам метрологического оборонного заказа и каталогизации оборонной продукции»*. – Ялта, 2019. – С. 77–78.

## **Основные источники отказов программно-аппаратных комплексов и подходы к их предупреждению**

**А.А. Звонарева**, к.т.н. А.О. Толоконский

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ – Москва, Россия

На всех этапах жизненного цикла АСУ ТП, от проектирования до эксплуатации, возникает необходимость контроля человеческой деятельности, которая часто в дальнейшем является источником неисправностей и ошибок работы. В отличие от программных, аппаратные неисправности диагностировать и устранить значительно проще. Существующие методы валидации и верификации программного обеспечения позволяют повысить надежность программных модулей, однако, далеко не все ошибки возможно предупредить данными способами.

В данной работе представлена характеристика основных источников отказов программно-аппаратных комплексов в атомной промышленности и рассмотрены методы предупреждения неисправностей.

## **The Main Sources of Software Control Systems Failures and Approaches to their Prevention**

**A.A. Zvonareva**, PhD A.O. Tolokonskiy

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute) – Moscow, Russia

All life cycle stages of the control system, from design to operation, there is a need to control human activity, which is often a source of malfunctions and errors in the future. Unlike software, hardware faults are much easier to diagnose and fix. Existing methods of software validation and verification can improve the reliability of software modules, however, not all errors can be prevented by these methods.

This paper presents the description of the main sources of control system software and hardware failures in the nuclear industry and considers methods for preventing malfunctions.

Всякое изделие является, как правило, продуктом человеческой деятельности, поэтому изготовление изделия тесно связано с многочисленными этапами этой деятельности:

- 1) предварительными научными исследованиями, на основании которых выявляется возможность создания изделия;
- 2) разработкой технического задания, в котором перечисляются выполняемые изделием функции и требования к ним;
- 3) эскизным и техническим проектированием, конечным результатом которого является полное описание создаваемого изделия;
- 4) рабочим проектированием, в результате которого появляется головной образец изделия;
- 5) испытанием и опытной эксплуатацией изделия, в процессе которых выявляются недостатки изделия и принимаются меры по устранению недостатков;
- 6) авторским надзором, предназначенным для недопущения неквалифицированного вмешательства в изменение изделия и возможности улучшения характеристик изделия на основе накопленного опыта промышленной эксплуатации.

Перечисленные этапы составляют основу жизненного цикла изделия. На каждом этапе непременно присутствует человеческая деятельность. Поэтому следует признать, что большинство дефектов, показатели качества и свойства изделия теснейшим образом связаны с человеческим фактором.

Какие же ошибки чаще всего допускаются людьми? Можно перечислить некоторые характерные ошибки для рассмотренных этапов:

- 1) неадекватное или неполное описание процессов, которые будут происходить при эксплуатации предполагаемого изделия, на этапе научных исследований;
- 2) недостаточно четкая формулировка в техническом задании необходимого перечня функций и требований к ним;
- 3) отсутствие должной информации о свойствах и характеристиках структурных элементов изделия на этапе технического проектирования;
- 4) ошибки, допускаемые эксплуатационным персоналом по невнимательности или недостаточной подготовленности.

Перечисленные выше ошибки неизбежно приводят к ухудшению показателей надежности и качества программных продуктов и АСУ в целом. Одним из важнейших показателей качества, используемым в атомной отрасли, является надежность изделия. Надежность – это способность выполнять изделием возложенные на него функции в течение заданного интервала времени. Понятие надежности является качественным и, кроме того, допускает определение отказа. Расчет показателей надежности является общепринятой практикой и входит в ГОСТ по проектированию систем управления [1]. Поскольку неотъемлемой частью АСУ ТП является программное обеспечение, то отказ программных изделий может вызвать потерю возможности выполнения требуемой функции. Чаще всего выявить ошибки в ПО и определить надежность продукта можно только на этапах тестирования и эксплуатации, однако сделать прогноз частоты появления ошибок возможно и на стадии проектирования. Более подробное описание моделей надежности программного обеспечения и расчет надежности ПО представлены в работе Бойковой [2].

Рассматривая возможные источники отказов ПО, можно разделить их на 3 группы:

- 1) несовершенство технического задания;
- 2) ошибки при программировании;
- 3) неправильная эксплуатация/изменение условий эксплуатации.

Неправильное формирование ТЗ на разработку программного обеспечения часто приводит к последующему выходу из строя ПО и отказу оборудования и/или системы управления в целом. Зачастую ошибки на этапе составления ТЗ являются самыми критичными и трудно прогнозируемыми, поскольку выявление ошибок на последующих этапах жизненного цикла изделия поддается программно-аппаратной диагностике.

Ошибка программирования – это, прежде всего, неверное исполнение программистом требований технического задания. Наиболее часто такие ошибки возникают при программировании сложных вычислительных алгоритмов, в которых имеется большое количество условий. Здесь могут быть ошибки при организации циклов (особенно вложенных), ошибки при выполнении логических переходов, неточная классификация переменных (например, в определении глобальных переменных) и т.д.

Для устранения или уменьшения числа ошибок рекомендуется модульное исполнение программного обеспечения. Модули не должны содержать большое число операторов. Известной реализацией этого подхода является создание библиотек стандартных подпрограмм. В своей работе Jung-Hua [3] продемонстрировал оценки надежности модульного программного обе-



спечения с учетом различных комбинаций входов и выходов системы, а также анализ робастности компонентов. Помимо модульного исполнения, в настоящий момент существуют программные проверки исходного кода на предмет синтаксических и логических ошибок. Одной из таких программ является SonarQube.

Отказы, возникающие вследствие эксплуатации, следует рассматривать с единой позиции: отказов функций управления всей системы (АСУ ТП). Все причины отказов программного обеспечения, возникающих при изменении условий эксплуатации, вряд ли можно назвать на стадии проектирования систем. Тем не менее, имеются определенные средства, позволяющие учесть этот неблагоприятный фактор. К таким средствам можно отнести:

- 1) предварительное обучение эксплуатационного персонала;
- 2) контроль результатов измерения физических величин на принадлежность реальному диапазону значений;
- 3) использование специальных алгоритмов обнаружения неисправных датчиков;
- 4) проведение профилактических работ с целью поддержания работоспособности технических средств и т.д.

Поскольку АСУ ТП является сложной системой, предполагается, что она обслуживается и используется рядом эксплуатационных подразделений. Поэтому можно ожидать отказы в работе программных средств от неправильных действий персонала. Данный вопрос касается не только своевременного и правильного обслуживания АСУ ТП персоналом, но и, например, действий операторов в пультовых. Современные системы управления обладают высокой стоимостью, поэтому защита от некорректных действий операторов является критически необходимым элементом. Более подробный анализ деятельности персонала АЭС и на химическом предприятии и влияние принятых решений в критических ситуациях представлено в работе Zarei [4].

Из-за специфики человеческого фактора невозможно перечислить все механизмы отказов по причине ошибок персонала. Однако ясно, что требуется применять, в первую очередь, организационные меры устранения подобных отказов. Например, дублирование действий при подготовке информации, автоматическая проверка правильности информации по выбранным признакам, проверка выполнения плана профилактических работ, документирование действий с целью повышения внимания и ответственности выполнения операций эксплуатационным персоналом и т. д.

Процесс разработки программных изделий, обладающих предположительно высоким качеством, в конечном итоге приводит к созданию реального продукта. Верификация является неотъемлемой частью создания программного изделия, который предполагает определение степени готовности этого изделия к эксплуатации. Верификация должна проводиться согласно утвержденной методике после предъявления разработчиком подготовленного им изделия или его части [5, 6]. Процедура верификации предполагает анализ всех требуемых согласно методике показателей качества. Однако, программа верификации готовится группой верификации, которая и определяет необходимый перечень показателей качества. Это связано с тем, что ряд требований к качеству ПО могут оказаться несущественными. Методика верификации ПО должна охватывать возможность выявления наиболее распространенных ошибок, встречающихся при создании программного обеспечения. При отрицательных результатах верификации программное изделие подлежит доработке.

Основным назначением этапа валидации ПО является подтверждение работоспособности программной продукции в реальных условиях ее эксплуатации. Валидация проводится согласно подготовленной программе, в которой предусматривается совместное тестирование технических и программных средств. Важным требованием к валидации является испытание всего



программно-технического комплекса в диапазоне всех значений сигналов, которые могут встретиться в процессе эксплуатации.

Несмотря на то, что на этапах верификации и валидации проводится тщательный анализ программного обеспечения и условий его работы, тем не менее, опыт показывает возможность появления в процессе эксплуатации ошибок работы ПО. Это связано с тем, что на этапе проектирования невозможно учесть все причины отказов ПО. Поскольку алгоритм программ может оказаться непротиворечивым, но отказы ПО, тем не менее, могут возникать, то требуется системный подход к обеспечению надежности ПО, учитывающий влияние всех факторов, приводящих к возможности появления отказа ПО. Если отказ ПО уже произошел, в идентификации источника и локализации проблемы полезно использовать метод декомпозиции и последовательного отсечения возможных источников. Данный метод позволяет не только устранить неисправность ПО, но и повысить надежность АСУ ТП в целом.

### Список литературы

1. ГОСТ 34.201-89.
2. О.Г. Бойкова, Т.Б. Чистякова, Д.И. Бокий. Методика оценки надежности программно-технических комплексов АСУ ТП для электростанций малой мощности. / В сборнике: Труды международной научно-практической конференции «Передовые информационные технологии, средства и системы автоматизации и их внедрение на российских предприятиях». – 2011. – С. 380–387.
3. Jung-Hua Lo, Chin-Yu Huang, Ing-Yi Chen, Sy-Yen Kuo, Michael R. Lyu. Reliability assessment and sensitivity analysis of software reliability growth modeling based on software module structure. – The Journal of Systems and Software. – 2005. – №76. – С. 3–13.
4. E. Zarei, F. Khan, R. Abbassi. Importance of human reliability in process operation: A critical analysis. – Reliability Engineering & System Safety. – 2021. – №211.
5. В.А. Власов, А.О. Толоконский, Г.А. Беседин, А.Н. Симашин. Верификация ПО для замкнутых систем управления // Ядерные измерительно-информационные технологии. – 2009. – №2. – С. 101–103.
6. В.А. Власов, А.О. Толоконский, В.Е. Голованев. Анализ вероятности отказа систем отображения // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2005. – №4. – С. 25–28.

## **Интегральные критерии качества в цифровых системах управления, построенных на базе ПТК**

**А.А. Иванова**, к.т.н. А.О. Толоконский

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ – Москва, Россия

В докладе рассматривается возможность применения квадратичских интегральных критериев качества для систем автоматического управления. Проведен анализ на предмет возможности и целесообразности применения такого критерия в цифровых системах управления, построенных на базе программно-технических комплексов с применением принципов оптимального управления.

Результатом проведенной работы стал вывод о возможности применения интегральных критериев качества в цифровых системах управления, построенных на базе программно-технических комплексов.

## **Integral Quality Criteria in Digital Control Systems Built on the Basis of Software and Hardware Complexes**

**A.A. Ivanova**, PhD A.O. Tolokonskiy

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute) – Moscow, Russia

The report considers the possibility of applying quadratic quality criteria for automatic control systems. The analysis is carried out for the possibility and expediency of applying this criterion in digital control systems built on the basis of software and hardware complexes.

The results of work carried out is a conclusion about the possibility of applying integral criteria in digital control systems built on the basis of software and hardware complexes.

В настоящее время в системах управления показатели качества процесса управления делятся на прямые и косвенные. Прямые показатели качества используются при настройке типовых законов регулирования. К таким показателям относятся свойства, определяемые по переходным характеристикам системы, а именно: величина ошибки регулирования, время установления, максимум переходной характеристики и т.д. Косвенные показатели качества бывают корневые, частотные и интегральные. Корневой критерий качества – это показатель колебательности. Критерии в частотной области – это амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) замкнутой системы и амплитудно-фазовые частотные характеристики (АФЧХ) разомкнутой системы [1, 2].

К интегральным критериям качества относятся: площадь под графиком переходной характеристики, линейный интегральный показатель, интеграл от квадрата ошибки и т.д. Минимизация интегрального критерия качества позволяет выбрать лучшую систему в классе, определяемом критерием.

Рассмотрим более подробно квадратичский критерий качества для системы автоматического управления и проведем анализ на предмет целесообразности его применения в цифровых системах автоматического управления, построенных на базе программно-технических комплексов с применением принципов оптимального управления.

В системах автоматического управления осуществляется сравнение эталонного процесса  $y_{эм}$  (уставка) от текущего состояния регулируемого параметра или желаемого значения процесса. Данная квадратичная оценка  $J_{эм}$  определяется уравнением (1):

$$J_{эм} = \int_0^{\infty} \delta^2(t) dt = \int_0^{\infty} [y_{эм}(t) - y(t)]^2 dt. \quad (1)$$

Квадратичная оценка  $J_{эм}$  – это площадь, ограниченная кривой отклонения  $\delta^2$  процесса управления в исследуемой системе  $y_{пер}$  от рационально назначенного наилучшего процесса  $y_{эм}$ . Необходимым условием сходимости оценки  $J_{эм}$  служит равенство:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |y_{эм}(t) - y(t)| = 0, \quad (2)$$

которое, в реальных системах регулирования обеспечивает работающий регулятор. В оптимальной системе регулирования обычно задаются значением критерия качества и в соответствии с ним выбирают управляющее воздействие [3].

Рассмотрим контур автоматического регулирования. На рис. 1 представлена система регулирования с классическим ПИ-регулятором, где  $SP$  – уставка,  $E$  – сигнал рассогласования,  $Y$  – управляющее воздействие,  $Z$  – возмущение,  $X$  – выходной сигнал (регулируемый параметр),  $PV$  – сигнал обратной связи.



Рис. 1. Структурная схема контура автоматического регулирования

Для представленной на рис. 1 системы добавим в алгоритм управления функции вычисления интегрального и мгновенного квадратичных отклонений. Это будет отклонение желаемого регулируемого параметра от реального выходного сигнала на выходе объекта управления. Интерфейс программы и уравнения вычисления интегральных и мгновенных квадратичных отклонений представлен на рис. 2.

Зададимся значением уставки на входе регулятора и при разных значениях настроечных параметров и рассмотрим реакцию системы регулирования. На рис. 3 показаны графики изменения желаемого значения (цифра 1), реакция объекта управления на управляющее воздействие (цифра 2), значения интегрального квадратичного критерия качества (цифра 3), значения мгновенного квадратичного критерия качества (цифра 4), при значении коэффициента пропорциональности регулятора  $K=2$  с. Из графиков на рис. 3 видно, что время выхода на уставку составляет приблизительно 24 секунды. При этом интегральный квадратичный критерий достигает своего максимального значения 9909,105.

В табл. 1 приведены значения максимального квадратичного критерия и время выхода на уставку при проведении аналогичного эксперимента при различных значениях коэффициента пропорциональности.

Из табл. 1 видно, что с ростом коэффициента пропорциональности регулятора уменьшается время переходного процесса. При этом значение интегрального критерия также уменьшается с ростом коэффициента пропорциональности регулятора. Такие результаты соответствуют улучшению качества регулирования. Однако при значительном увеличении коэффициента пропорциональности до  $K=50$  система регулирования переходит в режим автоколебаний.

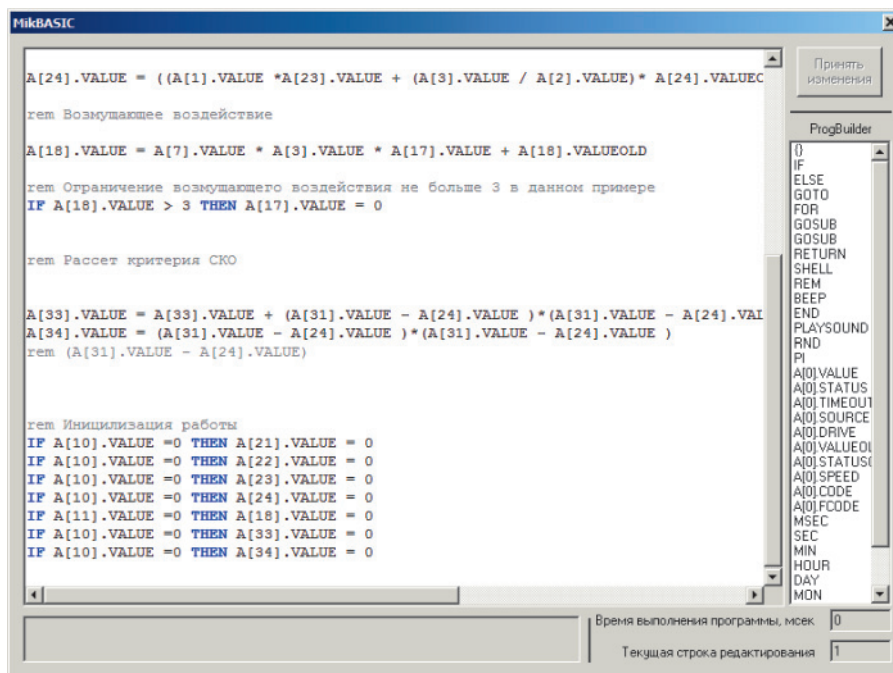


Рис. 2. Интерфейс программы вычисления интегральных и мгновенных квадратических отклонений

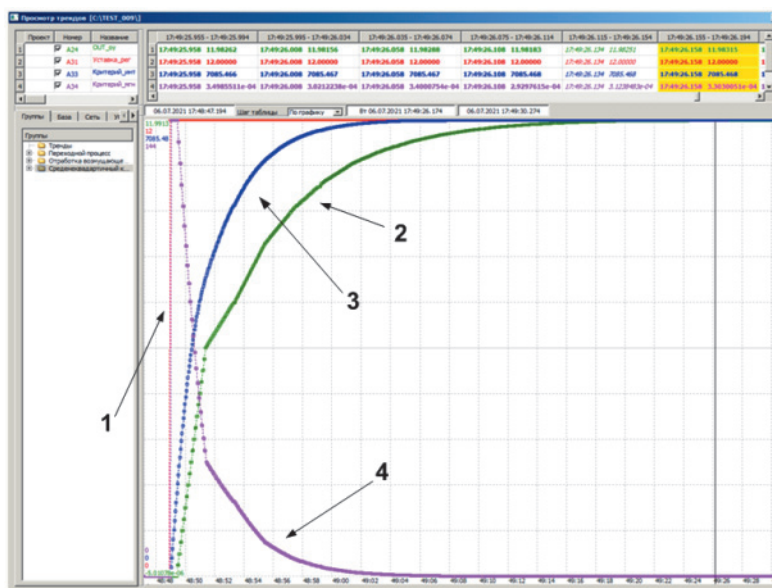


Рис. 3. Реакция системы регулирования при подаче на вход регулятора значения уставки 12 при коэффициенте пропорциональности  $K=4$

Таблица 1

Значения для различных коэффициентов пропорциональности

Значение коэффициента пропорциональности	Время выхода на уставку (секунды)	Максимальный квадратический критерий	Примечание
2	28	12331.480	
4	24	9909.105	
8	22	7085.468	
50	–	–	Режим автоколебаний

Регуляторы, с которыми происходит работа, имеют период вызова управляющего значения. Поэтому использование среднеквадратичных критериев качества по всему переходному процессу становится не совсем удобным, так как данный критерий не отражает качество рассчитанного управляющего воздействия в заданный промежуток времени между управляющими воздействиями. В таком случае лучше использовать среднеквадратичный критерий качества, вычисляемый на каждом периоде вызова регулятора.

На рис. 4 изображена реакция системы автоматического управления при коэффициенте пропорциональности  $K=6$ , которая обрабатывает управляющее воздействие с периодом вызова регулятора равное 2 секундам. С этим же периодом осуществляется расчет интегрального среднеквадратичного критерия качества системы управления, причем расчет осуществляется с обнулением значения критерия с предыдущего периода управления. На рисунке показаны: график изменения желаемого значения (цифра 1), реакция объекта управления (цифра 2), нарастающее в течение периода управления значение критерия качества (цифра 3). Из рис. 4 видно, что уставка достигается через 8 секунд, а значение критерия оптимальности уменьшается с уменьшением величины рассогласования.

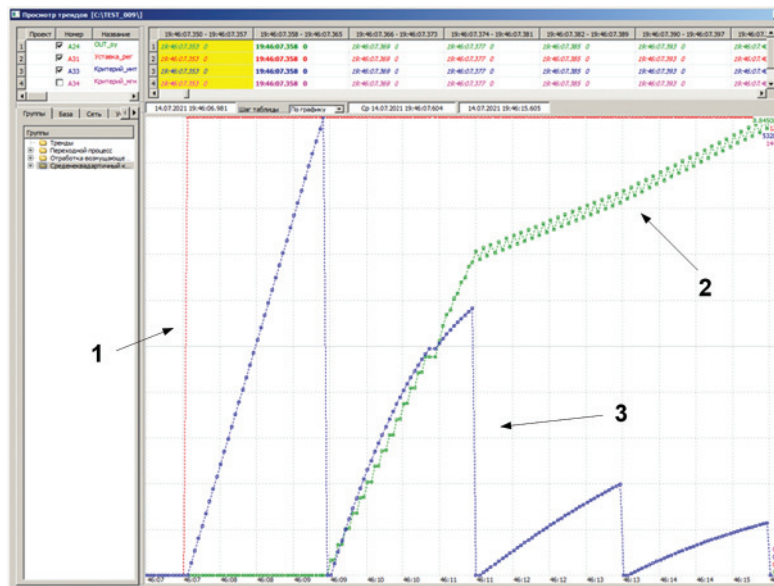


Рис. 4. Реакция системы регулирования при подаче на вход регулятора значения уставки 12 при коэффициенте пропорциональности  $K=4$  и расчете критерия качества управления каждый период вызова управляющего воздействия

Колебания, наблюдаемые на графике реакции объекта управления на управляющее воздействие, вызваны неидеальностью системы, помехами, маленьким шагом дискретизации программы и т.д.

Полученные в ходе исследования результаты позволяют сделать вывод о возможности использования среднеквадратичных критериев качества для оценки качества управления в цифровых системах управления, построенных на базе программно-технических комплексов, а также для реализации оптимальных законов управления, используя подобные аппаратные средства.

### Список литературы

1. В.В. Денисенко. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием / В.В. Денисенко. – М.: Горячая линия – Телеком, 2014. – 606 с., ил.
2. Г.К. Гудвин. Проектирование систем управления / Г.К. Гудвин, С.Ф. Греббе, М.Э. Сальгадо. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. – 911 с.: ил.
3. А.А. Фельдбаум. / Основы теории оптимальных систем. – М.: Наука, 1966 г. – 624 с., ил.



## **Комплексы технических средств физической защиты ядерных объектов. Опыт целевой подготовки специалистов**

д.т.н. **А.В. Измайлов**

АО «ФЦНИВТ «СНПО «Элерон» - Москва, Россия

Физическая защита ядерных объектов является неотъемлемой составляющей обеспечения их безопасности. Современные системы физической защиты (СФЗ) – сложные человеко-машинные системы, состоящие из организационной и инженерно-технических подсистем. Техническая составляющая СФЗ охватывает системы охранной сигнализации, оценки ситуации, контроля и управления доступом, связи, обеспечивающих средств и систем. В свою очередь, каждая из указанных подсистем состоит из множества сложных электронных устройств (средств обнаружения, наблюдения, контрольно-пропускных средств и т.п.). В настоящее время разработана системная методология анализа и проектирования современных СФЗ, реализация которой требует привлечения квалифицированных специалистов. В докладе рассмотрены вопросы подготовки кадров по физической защите ядерных материалов и объектов. Освещен более чем 30-летний опыт сотрудничества АО ФЦНИВТ «СНПО «Элерон» с НИЯУ «МИФИ» в данной области. Отмечается, что именно целевая подготовка молодых специалистов по СФЗ продемонстрировала свою эффективность, так как студенты «МИФИ» на ранней стадии, с 4-го курса, попадая на базовое предприятие, вникают в тонкости будущей специальности. По окончании университета они могут сразу же решать сложные научно-технические задачи и участвовать в проводимых «Элероном» НИОКР, направленных на создание и применение новых высокоэффективных технических средств физической защиты. Кратко рассмотрены методические вопросы обучения и содержания годичного курса лекций по физической защите, читаемого специалистами «Элерона».

### **Technical Security Systems (TSS) Complex for Nuclear Facilities. Experience in TSS Specialists Target Education**

Dr. **A.V. Izmaylov**

JSC FCS&HT "SNPO "Eleron" - Moscow, Russia

Nuclear facilities physical protection is essential part of the nuclear security. Modern physical protection systems (PPS) are complex man-machine systems. They consist of organizational and technical security subsystems. PPS technical part covers alarm system, surveillance, access control, communication systems etc. Each of mentioned above subsystems composed of variety sophisticated electronic devices (sensors, surveillance and access control equipment etc.). Systematic methodology for modern PPS analyzing and designing has been developed. This methodology application requires qualified specialists engagement. This paper considers the problem of human resource development in the area of nuclear materials and nuclear facilities physical protection. Also this paper highlights successful cooperation between JSC FCSHT SNPO “Eleron” and National Nuclear University MEPhI in the area. This activity lasts for more than 30 years. It should be mentioned that particularly target education of young specialists demonstrates an effectiveness. MEPhI students at 4th course starts their career at “Eleron” and form as PPS specialists at the earlier stage. After graduating from the University they can perform complex scientific and technical tasks and participate in research and development activities conducted by Eleron. Education methodology and one-year lector course on PPS (performed by “Eleron” qualified experts) considered shortly.



Функционирование ядерных и радиационно опасных объектов (ЯРОО) неразрывно связано с обеспечением их безопасности. Наряду с ядерной, радиационной, пожарной и другими видами безопасности важную роль играет физическая защита (ФЗ) указанных объектов от различного рода противоправных действий, потенциальных нарушителей (хищение ядерных материалов, диверсионно-террористические акции на ядерных установках и т.п.). Согласно Федеральному Закону «Об использовании атомной энергии» [1] физическая защита ядерных материалов и ядерных объектов является одним из основных видов ядерной деятельности, осуществление которой требует необходимого кадрового обеспечения. Это всячески декларируется и воплощается в жизнь Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ) [2, 3].

С целью реализации мероприятий по ФЗ на ЯРОО создаются системы физической защиты, которые представляют собой совокупность персонала физической защиты, осуществляемых им организационно-технических мероприятий, действий и комплекса инженерно-технических средств физической защиты.

Современные системы физической защиты (СФЗ) являются сложными человеко-машинными системами [4, 5], что накладывает свой отпечаток на квалификационные требования, предъявляемые к персоналу, задействованному на всех стадиях и этапах жизненного цикла СФЗ, включая аналитическую работу, проектирование, ввод в действие и функционирование СФЗ на особо важных объектах. Это также относится к специалистам, участвующим в создании технических средств и комплексов ФЗ для последующего их применения на объектах в составе систем физической защиты.

Кадровое обеспечение деятельности в области ФЗ является одной из ключевых проблем. В связи с этим возникает важная и актуальная задача наладить и постоянно совершенствовать систему подготовки, переподготовки и повышения квалификации специалистов разных профилей в данной области.

Для решения этой задачи на конкретном предприятии атомной отрасли необходимо определять потребность в специалистах того или иного профиля, требуемый уровень их квалификации и «источники», откуда можно брать кадры. Все это тесно связано со спецификой деятельности конкретного предприятия (ядерный или радиационно опасный объект, проектный институт, организация-разработчик технических средств физической защиты и т.п.).

При этом необходимо анализировать перспективные планы создания (совершенствования) СФЗ на объектах, а для предприятий, разрабатывающих и производящих технические средства физической защиты (ТСФЗ) – тенденции в развитии науки и техники в данной области и потребность в создаваемых ТСФЗ на объектах. Все это также касается задачи обеспечения кадрами такой специфической области, как безопасность транспортирования особо важных (опасных) грузов, включая ядерные и радиоактивные материалы [7].

Следует отметить, что решение кадровой проблемы связано с рядом сложностей. Во-первых, процесс «насыщения» кадрами по ФЗ – инерционный процесс, то есть сотрудники, принятые на предприятия, становятся специалистами по СФЗ только через определенное время, иногда через несколько лет. Далее, имеет место «текучка кадров» (по ряду причин). Ряд должностей в подразделениях безопасности объектов требует разносторонних компетенций, в том числе знания принципов работы и эксплуатации ТСФЗ, тактики действий сил реагирования в чрезвычайных ситуациях, менеджмента, контрактной деятельности с организациями-подрядчиками и т.п. Важно учитывать эти обстоятельства в процессе подбора кадров и поддержания квалификации персонала на должном уровне.

Действенным подходом к подготовке персонала является целевая подготовка молодых специалистов в высших учебных заведениях (университетах) соответствующего профиля. Молодые специалисты, поступающие на предприятие, будут в дальнейшем повышать свой уровень, опираясь на опыт данного предприятия, а также, проходя обучение в специализированных учебных центрах (например, в Технической академии Росатома). В необходимых случаях, когда предприятию по его тематике требуются высококвалифицированные специалисты по ФЗ, его сотрудники

могут готовить и защищать диссертации в соответствующих специализированных советах, что способствует повышению уровня выполняемых НИОКР и созданию научных школ.

В данном докладе рассмотрен многолетний опыт АО «ФЦНИВТ «СНПО «Элерон» по подготовке кадров в области ФЗ.

«Элерон» уделяет большое внимание данному вопросу. В 1988 г. совместными приказами Минсредмаша СССР и Минвуза СССР на «Элероне» был создан филиал кафедры «Автоматика» Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», зав. филиалом был назначен сотрудник «Элерона», профессор Измайлов А.В. За счет того, что студенты уже с 4-го курса проходят целевую подготовку на «Элероне» (годовой курс лекций по физической защите, практическая работа и курсовое проектирование в тематических подразделениях «Элерона» и т.п.), они на более ранней стадии вникают в тонкости специальности, быстрее формируются как специалисты. После защиты в МИФИ выпускных квалификационных работ (дипломов) по тематике «Элерона» мы имеем готовых инженеров, способных сразу же решать конкретные тематические задачи предприятия. Эта работа проводится и в настоящее время.

В процессе обучения мы уделяем внимание как общим вопросам физзащиты (нормативные и правовые документы по ФЗ, анализ потенциальных угроз и уязвимости ядерных объектов, оценка эффективности СФЗ и т.п.), так и конкретным вопросам разработки и применения различных типов технических средств и комплексов ФЗ, применяемых на ядерных объектах. К проведению занятий привлекаются ведущие специалисты «Элерона», имеющие большой теоретический и практический опыт. За время работы филиала подготовлено более 300 молодых специалистов, многие из которых продолжают работать на «Элероне», некоторые из них занимают ключевые должности (руководители подразделений, направлений и т.п.). Многие наши выпускники в настоящее время работают в Госкорпорации «Росатом», Ростехнадзоре, в силовых структурах и в международных организациях, таких как МАГАТЭ.

Следует отметить, что наши студенты получают знания и практические навыки в области физической защиты, которые могут быть востребованы не только в отношении ядерных материалов и объектов Госкорпорации «Росатом», но и для обеспечения безопасности других особо важных объектов страны, например, объектов Министерства обороны России, топливно-энергетического комплекса и др. [6].

После окончания МИФИ, в процессе дальнейшей работы на «Элероне», молодые специалисты повышают свою квалификацию на соответствующих семинарах и конференциях, проводимых как внутри предприятия, так и совместно с другими профильными предприятиями Госкорпорации «Росатом» (НИКИРЭТ, «Дедал» и др.). Сотрудники «Элерона» также периодически направляются на курсы повышения квалификации в Техническую академию «Росатома» (г. Обнинск), а иногда и на тренинг-курсы, организуемые МАГАТЭ.

В связи с широким спектром работ, выполняемых «Элероном», предприятию требуются специалисты различного профиля, поэтому кроме НИЯУ «МИФИ» нами планируется организовать подобную работу по целевой подготовке специалистов и в других ведущих московских университетах (НИУ «МЭИ», МВТУ им. Баумана, МИРЭА и др.).

С целью дальнейшего повышения научно-технического уровня сотрудников «Элерона» в 2008 г. решением Министерства науки и образования России при «Элероне» создан закрытый специализированный совет ДС 201.018.01 по защите кандидатских и докторских диссертаций, работает учебный центр, осуществляющий подготовку соискателей ученых степеней. За истекший период в Совете защищено более 20 кандидатских диссертаций, авторами большинства из которых являлись сотрудники «Элерона». Более 50% защитившихся являются выпускниками упомянутого выше филиала кафедры «Автоматика» НИЯУ «МИФИ» на «Элероне», что еще раз подтверждает эффективность целевой подготовки молодых специалистов.

Таким образом, на «Элероне» создана научная школа, осуществляющая поэтапную подготовку квалифицированных специалистов по физической защите, включая целевую подготовку молодых специалистов, повышение квалификации сотрудников предприятия, вплоть до

защиты ими кандидатских диссертаций. Все это способствует повышению качества выполняемых «Элероном» НИОКР и работ по созданию высокоэффективных СФЗ на конкретных российских особо важных объектах Госкорпорации «Росатом», Министерства обороны России, других министерств и ведомств. Кстати, «Элерон» зачисляет в соискатели ученых степеней и сотрудников других предприятий с последующей защитой диссертации в указанном Совете.

Представляется целесообразным также отметить некоторые общие проблемные моменты, связанные с подготовкой кадров в области ФЗ.

Во-первых, каждое предприятие должно тщательно проанализировать потребность в специалистах того или иного профиля. При этом надо ориентироваться на перспективные планы развития предприятия и выполняемых им работ. Это надо учитывать в связи с инерционностью адаптации вновь принятых на работу сотрудников и с продолжительностью целевого обучения студентов.

Далее, необходимо создать условия для профессионального роста сотрудников (творческая среда, мотивация и т.п.), обеспечение социальных гарантий, что может в какой-то мере воспрепятствовать «текучке» кадров.

Очень важным моментом является создание условий для передачи знаний от опытных сотрудников предприятия молодым, что позволит сократить время их адаптации на предприятии. К сожалению, на практике это не всегда осуществляется.

Поэтому, предприятиям атомной отрасли, располагающимся в российских регионах, целесообразно отдавать предпочтение сотрудничеству со своими региональными высшими учебными заведениями, в том числе с филиалами НИЯУ МИФИ. Не секрет, что иногородние студенты-выпускники московских вузов, по статистике, стараются остаться в Москве и далеко не всегда возвращаются в свои регионы на соответствующие предприятия.

### **Заключение**

1. На примере деятельности АО «ФЦНИВТ «СНПО «Элерон» показано, что наиболее перспективным направлением подготовки кадров по физической защите является целевая подготовка молодых специалистов, что сокращает время адаптации вновь принимаемых сотрудников на предприятия. Более чем 30-летний опыт сотрудничества «Элерона» с НИЯУ МИФИ показал эффективность такого подхода.

2. Подготовка кадров по ФЗ должна вестись на системной основе путем поэтапного повышения квалификации сотрудников предприятия, включая целевую подготовку молодых специалистов в университете, различные формы повышения квалификации на предприятии и в учебных центрах, вплоть до защиты диссертаций в специализированных советах. При этом надо увязывать процесс повышения квалификации с тематическими планами предприятий, учитывая определенную инерционность данного процесса, то есть заранее прогнозировать и своевременно корректировать потребность в кадрах тех или иных специальностей.

### **Список литературы**

1. Федеральный закон №170-ФЗ «Об использовании атомной энергии», 1995 г. (с дополнениями и изменениями).
2. Рекомендации по физической ядерной безопасности, касающиеся физической защиты ядерных материалов и ядерных установок (INFCIRC/225/Revision 5). Серия документов МАГАТЭ NSS, №13.
3. Educational Programme in Nuclear Security. Серия документов МАГАТЭ NSS, №12.
4. Бондарев П.В., Измайлов А.В., Толстой А.И. Физическая защита ядерных объектов. – М.: НИЯУ «МИФИ» (учебное пособие). – 2008 г.
5. Бушуев А.В., Глебов В.Б., Гераскин Н.И., Измайлов А.В. Введение в физическую защиту, учет и контроль ядерных материалов. – М.: НИЯУ «МИФИ» (учебное пособие). – 2007 г.
6. Федеральный закон №256-ФЗ «О безопасности объектов топливно-энергетического комплекса», 2011 г.
7. Федеральный закон №16-ФЗ «О транспортной безопасности», 2007 г.

## Стендовая отработка инерциально-спутниковых систем навигации и автоматического управления

**В.В. Ильиных**, М.С. Чертков, С.В. Андреев, к.т.н. А.В. Ключников

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина» – Снежинск, Россия

Рассмотрена проблема отработки инерциально-спутниковых систем навигации и автоматического управления беспилотных летательных аппаратов в наземных условиях до проведения лётных испытаний. Решение проблемы достигается путём последовательной отработки систем навигации и автоматического управления на математическом (виртуальном), имитационном, полунатурном поворотном и передвижном стендах. Использование целого комплекса экспериментальных стендов позволяет эффективно обрабатывать системы навигации и автоматического управления, тем самым качественно подготавливая беспилотные летательные аппараты к проведению натурных испытаний.

## On-Stand Tryout of Inertial Satellite Navigation Systems under Automatic Control

**V.V. Ilinykh**, M.S. Chertkov, S.V. Andreyev, PhD A.V. Klyuchnikov

FSUE Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin Russian Research Institute for Technical Physics – Snezhinsk, Russia

Refining procedure of both inertial satellite navigation systems and automatic control of unmanned flying vehicles prior to flight test is presented. The procedure consists in step-by-step running of the navigation system under automatic control at mathematical (virtual), simulative, scaled-down turning and mobile stands. The use of a complex of experimental stands enables effective maturing of the navigation systems under automatic control thus allowing qualitative preparation of unmanned flying vehicles for verification nature test.

Системы навигации и автоматического управления (СНАУ) современных беспилотных летательных аппаратов (БЛА) различного назначения обычно строятся на базе инерциальной системы навигации. Суть инерциальной навигации заключается в определении координат местоположения подвижного объекта методом двойного интегрирования составляющих действующего на объект ускорения. Исходной информацией являются проекции векторов кажущегося ускорения и абсолютной угловой скорости, измеряемые акселерометрами и датчиками угловой скорости (ДУС) соответственно. Для повышения точности навигации СНАУ обычно комплексирована с аппаратурой спутниковой навигации (АСН) [1, 2]. В состав инерциально-спутниковой СНАУ (ИССНАУ) входят:

- блок чувствительных элементов (БЧЭ), содержащий акселерометры, ДУС и сервисную электронику;
- бортовая электронно-вычислительная машина (БЭВМ), решающая задачи навигации, ориентации, стабилизации и управления движением, осуществляющая информационный обмен с приборами и системами изделия и выдающая команды управления;
- бортовая АСН (БАСН).

Бортовое программное обеспечение (ПО) ИССНАУ, реализованное в БЭВМ, фактически состоит из двух основных частей: функционального ПО, реализующего алгоритмы навигации и управления движением, и системного ПО, реализующего алгоритмы диспетчеризации устройств согласно штатной циклограмме работы.

Наземная отработка ИССНАУ позволяет существенно сократить сроки разработки ПО, обеспечить его надёжность и качество [3], провести отработку информационного и электрического взаимодействия инерциальной и спутниковой частей ИССНАУ как между собой, так и с внешними системами (см. рис. 1) и значительно сократить затраты на проведение лётных испытаний. Эти задачи обычно решаются путём отработки ИССНАУ на моделирующих стендах. В РФЯЦ-ВНИИТФ для отработки ИССНАУ разработаны и используются виртуальный, имитационный, полунатурный поворотный и передвижной стенды.

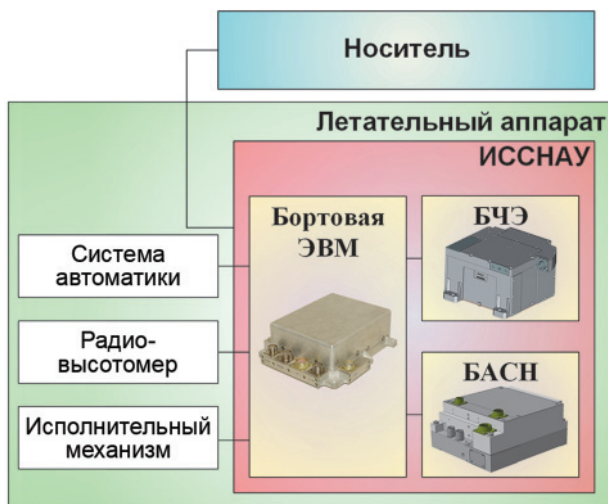


Рис. 1. Схема ИССНАУ

В табл. 1 приведён обзор экспериментальной базы для отработки ИССНАУ.

Таблица 1

Экспериментальная база для отработки ИССНАУ

	Виртуальный стенд	Имитационный стенд	Полунатурный (поворотный) стенд	Передвижной стенд	Лётные испытания
Отработка алгоритмов	алгоритмы навигации и управления	алгоритмы навигации и управления, системные	алгоритмы навигации и управления, системные	алгоритмы навигации, частично системные	все алгоритмы
Использование приборов: – БЧЭ – БЭВМ – БАСН	– – –	– + –	частично + частично	+ + +	+ + +
Отработка протоколов информационного взаимодействия	–	частично	частично	частично	+
Оценка ошибок: – методических – инструментальных	+ –	+ –	+ частично	+ +	+ +
Достоверность отработки	определяется моделью ошибок	определяется моделью ошибок	определяется методикой и моделью ошибок	определяется методикой	максимальная



Виртуальный стенд предназначен для разработки функциональных алгоритмов, а также математического моделирования динамики управляемого полёта БЛА и функционирования приборов ИССНАУ без использования реальных приборов.

Имитационный стенд используется совместно со штатной БЭВМ ИССНАУ и позволяет в реальном масштабе времени отрабатывать функциональные и системные алгоритмы и бортовое ПО ИССНАУ [4]. Имитационный стенд включает в свой состав:

- персональный компьютер в промышленном исполнении, который выполняет функцию имитатора приборов ИССНАУ и внешних систем;
- персональный компьютер, используемый для расчета динамики БЛА, а также для визуализации полёта, постобработки и хранения результатов экспериментов;
- модуль сопряжения, обеспечивающий физическое подключение БЭВМ ИССНАУ к промышленному компьютеру, подачу питания на БЭВМ и электрическое согласование цепей.

При отработке ИССНАУ на имитационном стенде применяются методы математического и имитационного моделирования: стенд позволяет имитировать приборы из состава ИССНАУ и приборы, осуществляющие обмен с ИССНАУ в соответствии с их протоколами электрического и информационного взаимодействия.

Создание имитационного стенда позволило создать научно-технический задел в области технологии имитационного и полунатурного моделирования и тем самым выработать общее направление по созданию комплексов полунатурного моделирования для отработки ИССНАУ.

Стенд полунатурного моделирования на базе трёхосного поворотного стенда реализует весь функционал имитационного стенда и дополнительно использует показания ДУС БЧЭ и БАСН ИССНАУ [5]. При отработке алгоритмов инерциальной навигации БЧЭ ориентируется в пространстве в соответствии с угловым перемещением БЛА на обрабатываемой траектории движения, и при решении навигационной задачи используются реальные показания ДУС и математический (программный) подыгрыш показаний акселерометров. При отработке алгоритмов инерциально-спутниковой навигации дополнительно используется навигационное решение БАСН. Текущие координаты и скорости БАСН рассчитывает по физическому подыгрышу сигналов навигационных спутников от имитатора спутникового созвездия в соответствии с обрабатываемой траекторией. В состав поворотного стенда входит:

- трёхосный поворотный стенд;
- пульт управления стендом, обеспечивающий управление работой стенда, электрическое и информационное взаимодействие с БЭВМ, БЧЭ и БАСН ИССНАУ, подыгрыш показаний акселерометров БЧЭ, сигналов навигационных спутников для БАСН и подыгрыш сообщений внешних систем, а также расчет динамики БЛА и хранение результатов моделирования. Пульт управления включает два персональных компьютера в промышленном исполнении, имитатор спутникового созвездия, модуль сопряжения, коммутатор, блок питания;
- автоматизированное рабочее место оператора на базе персонального компьютера.

Передвижной стенд представляет собой измерительно-навигационный комплекс, размещённый на наземном автономном транспортном средстве [6]. Передвижной стенд предназначен для отработки навигационных алгоритмов и ПО ИССНАУ в движении с использованием реальных показаний БЧЭ и БАСН. В процессе отработки ИССНАУ решает типовые задачи навигации согласно штатной циклограмме работы (начальная выставка по внешней информации, автономная инерциальная навигация, навигация в режиме комплексирования с АСН). Навигационное решение ИССНАУ в процессе отработки сопоставляется с данными ведущей инерциально-спутниковой системы навигации (ИССН), входящей в состав стенда и имеющей более высокую точность измерений, нежели контролируемая ИССНАУ, при этом точность определения координат и углов ориентации контролируется с помощью геодезических средств измерений.



В состав передвижного стенда входит:

- пульт управления и питания, предназначенный для физического подключения ИССНАУ к стенду, подачи питания и электрического согласования цепей, для управления функциональными частями и модулями стенда, для задания и контроля углов ориентации ИССНАУ (с помощью тахеометра и брускового уровня). В состав пульта управления и питания входят: персональный компьютер в промышленном исполнении, ноутбук, модуль сопряжения, поворотное устройство, аккумуляторные батареи, инвертор тока и панель электропитания;
- ведущая ИССН, навигационные показания которой используются в качестве внешних для ИССНАУ навигационных определений;
- геодезическое оборудование, предназначенное для определения, задания и контроля угла азимута (курса) и координат тестируемой ИССНАУ и ведущей ИССН.

Использование рассмотренной экспериментальной базы позволяет проводить комплексную наземную отработку ИССНАУ. При этом:

- использование виртуального стенда позволяет быстро и эффективно разрабатывать функциональное алгоритмическое и программное обеспечение;
- использование имитационного стенда позволяет эффективно разрабатывать бортовое функциональное и системное программное обеспечение и оперативно контролировать его работоспособность;
- использование полунатурного стенда благодаря физическому моделированию угловых эволюций БЛА и сигналов навигационных спутников позволяет исследовать возможные погрешности в показаниях ДУС, доступность и качество навигационного решения БАСН, тем самым отрабатывать возможные траектории движения и оценивать достижимую точность инерциально-спутниковой навигации на земле, то есть до проведения натуральных испытаний;
- использование передвижного стенда позволяет исследовать и отрабатывать как общее функционирование алгоритмов инерциально-спутниковой навигации, так и нюансы информационного взаимодействия составных частей ИССНАУ в условиях их реальной работы. Отработка ИССНАУ на передвижном стенде с использованием реальных показаний БЧЭ и БАСН позволяет избежать возможных ошибок, которые без штатной работы реальных приборов обнаружить невозможно, но которые могут возникнуть на последующих этапах лётных испытаний.

Таким образом, последовательная отработка ИССНАУ на рассмотренных стендах обеспечивает глубокую комплексную наземную отработку аппаратного и программного обеспечения ИССНАУ до проведения дорогостоящих натуральных испытаний.

### Список литературы

1. Матвеев В.В., Распопов В.Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. – СПб.: ГНЦРФ ОАО «Концерн «ЦНИИ«Электроприбор», 2009. – 280 с.
2. Salychev O.S. Applied Inertial Navigation: Problems and Solutions. Moscow: VMSTU Press, 2004. – P. 304.
3. Андреев С.В., Власов М.А., Ильиных В.В., Ключников А.В., Плетенев И.В. Обеспечение надежности и качества программного обеспечения навигационной системы беспилотного летательного аппарата путем улучшения технологии отработки и испытаний // Труды международного симпозиума «Надёжность и качество». – Пенза, 2018. – Т.2. – С. 32–34.
4. Чертков М.С., Андреев С.В., Ильиных В.В., Ключников А.В., Михайлов Е.Ф. Алгоритмическое и аппаратное обеспечение стенда имитации динамики полёта объекта // Труды международного симпозиума «Надёжность и качество» – Пенза, 2011. – Т. 1. – С. 165–166.
5. Андреев С.В., Ключников А.В., Чертков М.С., Шалашов С.В. Полунатурное моделирование ИНС на поворотном стенде при использовании БЧЭ с интерфейсом МКИО // Труды МНТК «Проблемы автоматизации и управления в технических системах». – Пенза, 2013. – С. 424–427.
6. Ильиных В.В., Андреев С.В., Ключников А.В. Особенности реализации трассы передвижного стенда для отработки систем навигации. Труды международного симпозиума «Надёжность и качество». – Пенза, 2019. – Т. 1. – С. 153–155.

## **Применение симулятора для отладки алгоритмов группового управления коллаборативными подводными роботами**

**Я.М. Каменев**

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ – Москва, Россия

Тестирование алгоритмов управления подводными многоагентными коллаборативными робототехническими системами во время натурных испытаний – дорогостоящий и трудозатратный процесс, сопряженный с большим числом рисков. Использование компьютерного симулятора позволяет избежать этих проблем.

## **Using Computer Simulation for Testing Group Control Algorithms for Collaborative Underwater Robots**

**Ya.M. Kamenev**

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute) – Moscow, Russia

Testing control algorithms for underwater multi-agent collaborative robotic systems during natural tests is high-risk and labor-intensive process. Using a computer simulator helps to avoid these problems.

Неотъемлемой частью разработки сложных робототехнических комплексов является тестирование и отладка программной части. Для ее тестирования требуются не только уже готовые и рабочие роботы вместе с сопутствующим оборудованием, но и помещение, персонал и время. Также не стоит забывать, что подобные мероприятия сопряжены с риском повреждения части или полной потери роботов.

Для того чтобы избежать описанных выше трудностей, первичное тестирование алгоритмов управления можно проводить виртуально, используя компьютерный симулятор. Использование компьютерного симулятора не только снижает риски, но и ускоряет разработку, поскольку позволяет программистам совершить несколько циклов отладки еще до момента готовности макетов тестируемых устройств.

В современной робототехнике часто используется иерархическая структура системы управления, которая делится на стратегический, тактический и исполнительный уровни [1].

Исполнительный уровень формирует и посылает управляющие сигналы на исполнительные устройства. Основными исполнительными устройствами в случае подводного аппарата являются движители, или винтомоторные агрегаты, с помощью которых подводный аппарат перемещается в пространстве.

Тактический и стратегический уровни располагаются на микрокомпьютере внутри корпуса подводного аппарата и реализованы с помощью фреймворка ROS (Robot Operating System). Эти уровни отвечают за организацию выполнения очередной задачи, а также за выбор текущей задачи для выполнения. Поскольку ROS можно запустить на любом компьютере с установленной операционной системой на базе ядра Linux, то его запуск также возможен на персональном компьютере.

Таким образом, возникает возможность использовать для отладки тактического и стратегического уровня управления подводным аппаратом не сам подводный аппарат, а его компьютерную симуляцию. Для этого необходимо заменить его программным обеспечением, реализующим те же интерфейсы, что и реальный подводный аппарат (рис. 1).

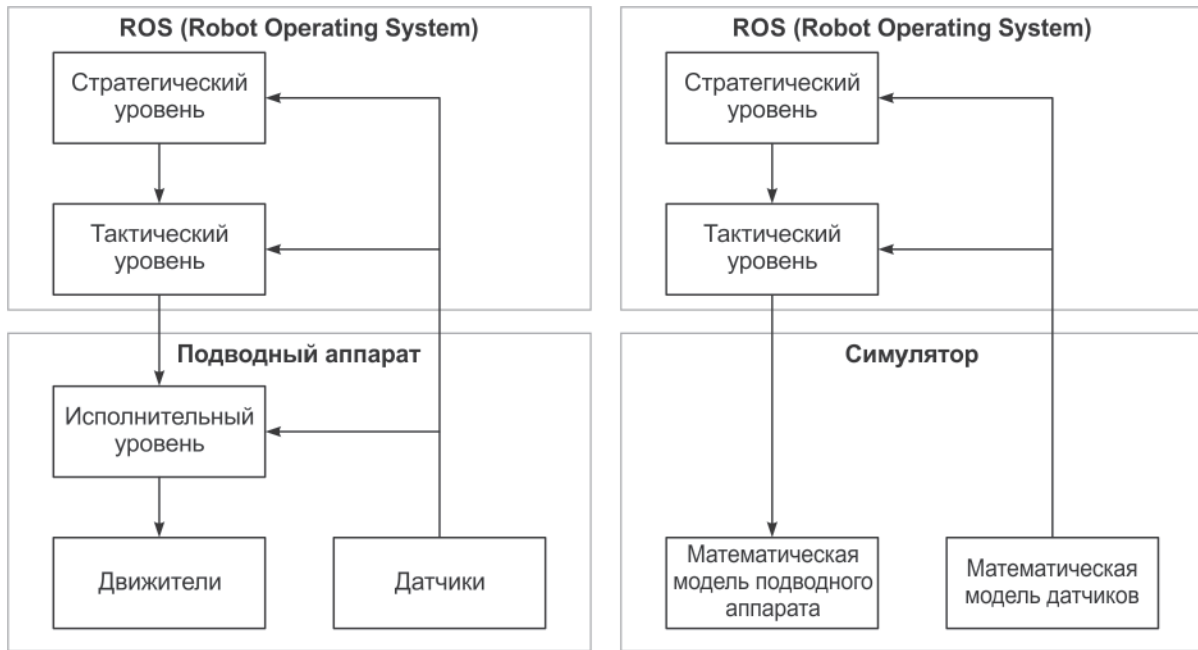


Рис. 1. Структура системы управления подводным аппаратом при натуральных испытаниях (слева) и при использовании симулятора (справа)

Симуляторы не первый год применяются в разработке робототехнических комплексов. Свое применение в этой области нашли как специализированные программы (Matlab Simulink с различными модулями визуализации), так и встроенные в открытые решения для управления роботами симуляторы (Gazebo). В данном случае предлагается использовать симулятор LGSVL.

LGSVL Simulator – симулятор для автономных систем вождения на основе Unity. Механизм моделирования имеет открытый исходный код, и вся система спроектирована так, чтобы пользователи могли использовать LGSVL для различных приложений и вносить свой вклад в экосистему [2]. Он также обладает реалистичной графикой, что позволяет отлаживать систему технического зрения роботов.

Важным преимуществом LGSVL являются уже реализованные математические модели датчиков (инерционные измерительные комплексы, видеокамеры, дальномеры), плагины для интеграции с ROS, возможность добавлять в симуляцию дополнительных агентов (например, пешеходов), а также возможность добавления нескольких объектов управления, а значит и формирования групп.

Однако, однозначным минусом данного симулятора является отсутствие встроенной поддержки подводных аппаратов. Для того чтобы проводить симуляцию подводных аппаратов в симуляторе LGSVL, в него необходимо добавить:

- динамическую модель подводного аппарата;
- подводную сцену и визуальные эффекты для более реалистичного эффекта подводной съемки;
- 3D-модели подводных аппаратов и дополнительных агентов (в данном случае дайверов).

Реализация динамики подводного аппарата возможна благодаря добавлению новой модели Full Model Interface (FMI). Уравнения динамики подводного аппарата представлены в формуле ниже:

$$\begin{cases} (m + \lambda_{ij}) \frac{d\bar{V}}{dt} = \bar{R}_{\partial s} + \bar{R}_a + \bar{R}_e + \bar{R}_z + \bar{R}_m, \\ (J + \lambda_{ij}) \frac{d\bar{\omega}}{dt} = \bar{M}_{\partial s} + \bar{M}_a + \bar{M}_e + \bar{M}_z + \bar{M}_m, \end{cases} \quad (1)$$

где  $m$  и  $J$  – масса и момент инерции подводного аппарата;  
 $\lambda_{ij}$  – присоединенные массы;  
 $\vec{V}, \vec{\omega}$  – линейная и угловая скорость;  
 $\vec{R}_{\text{дв}}, \vec{M}_{\text{дв}}$  – сила и момент тяги двигателей;  
 $\vec{R}_a, \vec{M}_a$  – сила Архимеда и вызываемый ей момент;  
 $\vec{R}_g, \vec{M}_g$  – возмущающие силы и моменты;  
 $\vec{R}_c, \vec{M}_c$  – сила и момент гидродинамического сопротивления;  
 $\vec{R}_m, \vec{M}_m$  – сила тяжести и вызываемый ей момент.

Сделаем предположение, что подводный аппарат, используемый для натуральных испытаний, будет иметь нейтральную плавучесть. Также сделаем предположение, что центр масс, центр приложения силы тяжести и центр приложения силы Архимеда будут находиться на одной прямой, перпендикулярной горизонтальной плоскости. Также в данной работе мы не будем рассматривать возмущающие силы и моменты.

В движке Unity уже реализована инерция и просто добавление новых сил, действующих на тело. Таким образом, необходимо добавить присоединенные массы и моменты к массе и моментам инерции подводного аппарата и силу гидродинамического сопротивления, которая считается по следующей формуле:

$$\vec{R}_c = -\vec{V}(C_{V1}|V| + C_{V2}), \quad (2)$$

где  $C_{V1}$  и  $C_{V2}$  – коэффициенты гидродинамического сопротивления.

Все параметры (масса, присоединенные моменты и массы, коэффициенты гидродинамического сопротивления, характеристики двигателей) можно вынести в отдельные константы, которые будут располагаться в файле с описанием модели FMI.

Экспортируем модель подводного аппарата «Кусто III» из системы автоматизированного проектирования Solidworks, разместим на ней точки, в которых будут располагаться камеры, и определим их направление, в данном случае это нижняя и передняя камеры, добавим все это в модель FMI.

Для симуляции необходимо собрать сцену. Для этого возьмем 3D-модель бассейна, в котором проводятся соревнования по подводной робототехнике SAUVC (Singapore Autonomous Underwater Vehicle Challenge), добавим в нее эффект бликов от поверхности воды, освещение и эффект тумана (fog), который будет имитировать размытие и ограниченную дальность видимости под водой. Также добавим в сцену донное оборудование (разноцветные ворота, колонны, корзины).

Для нужд отладки коллаборативных систем необходимо добавить модели дополнительных агентов. В нашем случае это модель дайвера. В официальном магазине Unity имеется несколько моделей дайверов, выберем наиболее реалистичную.

Итоговый вид симуляции представлен на рис. 2.

Для связи с программным обеспечением тактического и стратегического уровня в симуляторе LGSVL имеется готовый плагин RosBridge. С его помощью можно связать выходные ноды (Nodes) программного обеспечения подводного аппарата и непосредственно симулятор. Для этого будет необходимо написать отдельные ноды, которые будут запускаться в режиме симулятора и иметь интерфейс, идентичный с нодами, которые будут использоваться в режиме натуральных испытаний. Таким образом, программное обеспечение подводного аппарата сможет посылать задающие сигналы на модель подводного аппарата, получать изображение с камер и телеметрию от датчиков.

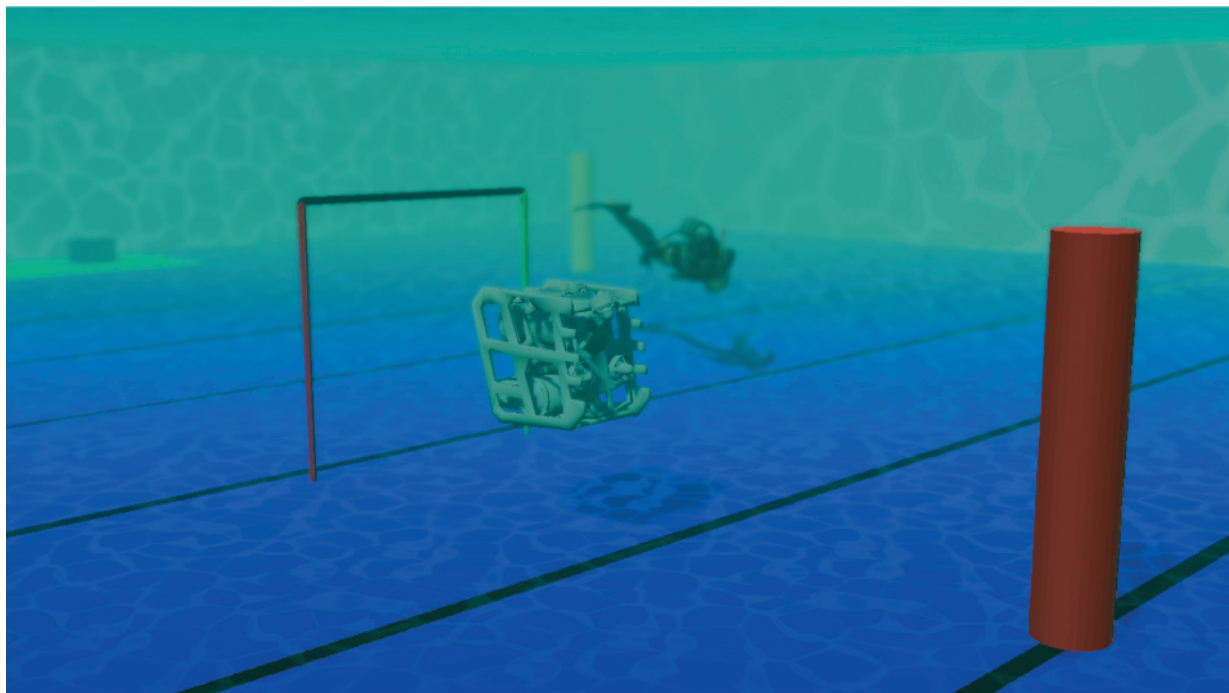


Рис. 2. Подводная сцена, на которой находятся подводный аппарат «Кусто III» и дайвер

В симуляцию можно добавлять несколько управляемых объектов (подводных аппаратов) и сторонних агентов (дайверов), которыми будет управлять разное программное обеспечение. Таким образом можно производить отладку групповых коллаборативных подводных робототехнических систем перед проведением натуральных испытаний. Кроме того, с помощью ROS можно организовать запуск программного обеспечения подводного аппарата и симуляции на разных машинах, а LGSVL поддерживает запуск симуляции в облаке, что может решить проблему недостатка вычислительных ресурсов. LGSVL крайне удобен в использовании, поскольку имеет понятный графический интерфейс, уже написанные плагины для связи с ROS, математические модели датчиков и возможность легко собирать симуляции различных сценариев. Также большим преимуществом LGSVL является открытый исходный код, который позволяет добавлять новые модели динамики в симулятор.

### Список литературы

1. Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Костенко В.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М., Щербатюк А.Ф. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение / Владивосток: Дальнаука. – 2018. – 368 с.
2. Rong, Guodong & Shin, Byung & Tabatabaee, Hadi & Lu, Qiang & Lemke, Steve & Mozeiko, Martins & Boise, Eric & Uhm, Geehoon & Gerow, Mark & Mehta, Shalin & Agafonov, Eugene & Kim, Tae & Sterner, Eric & Ushiroda, Keunhae & Reyes, Michael & Zelenkovsky, Dmitry & Kim, Seonman. LGSVL Simulator: A High Fidelity Simulator for Autonomous Driving. - 1-6. 10.1109/ITSC45102.2020.9294422.



## Сравнительный анализ алгоритмов интеллектуального анализа данных для обработки неструктурированных данных

д.т.н. Е.М. Абакумов<sup>1</sup>, А.В. Горлов<sup>2</sup>, **М.Д. Кириллова**<sup>1,2</sup>, к.т.н. О.В. Ульянин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ – Москва, Россия;

<sup>2</sup> ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова» – Москва, Россия

В данном исследовании рассматриваются требования, предъявляемые к алгоритмам интеллектуального анализа данных для систем мониторинга. Также рассмотрены наиболее распространенные подходы к кластеризации данных и оценка их применимости для выделенных требований.

## Comparative Review of the Intellectual Data Analysis Algorithms for Unstructured Data Processing

Dr. E.M. Abakumov<sup>1</sup>, A.V. Gorlov<sup>2</sup>, **M.D. Kirillova**<sup>1,2</sup>, PhD O.V. Ulianin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute) – Moscow, Russia;

<sup>2</sup> FSUE Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA) – Moscow, Russia

This research provides requirements to the intellectual data analysis algorithms for monitoring systems. In addition, the most commonly used approaches to the data clusterisation and estimation of its applicability for received requirements are considered.

### Введение

Цифровизация многих сфер деятельности привела к увеличению количества данных, которые требуется обрабатывать. На предприятиях оборонно-промышленного комплекса активно внедряются системы мониторинга за различными технологическими и информационными процессами. При анализе данных в подобных системах возникают задачи, связанные с анализом большого количества разнородных данных, подверженных динамическому изменению.

Определение релевантных событий, которые могут привести к негативным последствиям на предприятии, чаще всего выполняется методами экспертной оценки, что представляет собою трудоемкую задачу ввиду широкого спектра научно-технических, технологических и коммерческих направлений. С целью уменьшения трудоемкости и повышения качества определения событий используются методы интеллектуального анализа данных, с помощью которых возможно обнаружение аномальных событий, сложно выявляемых экспертами ввиду невозможности учесть коррелирующие воздействия различных объектов информатизации. Использование алгоритмов кластеризации позволяет выявлять аномальные события и взаимосвязи между гетерогенными источниками, при этом алгоритмы не требуют ни априорных наборов тестовых данных, предварительно созданных пользователями, ни знаний в предметной области [1–2].

На сегодня не представлены работы в области интеллектуального анализа данных, где интеллектуальный анализ данных использовался бы в качестве инструмента определения событий инцидентов информационной безопасности и дальнейшей классификации инцидентов. Существующие обзоры на методы кластеризации [3–4] не отражают специфику систем мониторинга в целом и задач классификации инцидентов в частности.



В сфере информационной безопасности также имеется множество работ, посвященных использованию интеллектуального анализа данных для выявления аномального поведения пользователей в компьютерных системах [5] и обнаружения вторжений в локальные сети [6–8].

В данном исследовании рассматриваются требования, предъявляемые к алгоритмам интеллектуального анализа данных для систем мониторинга. Также рассмотрены наиболее распространенные подходы к кластеризации данных и оценка их применимости для выделенных требований.

### **Особенности применения алгоритмов интеллектуального анализа данных**

Системы мониторинга в центрах управления информационной безопасности должны контролировать большое количество взаимосвязанных объектов, привязанных к различным типам объектов информатизации. В настоящий момент, согласно нормативно-правовой базе, понятие мониторинга информационной безопасности изменяется и пересматривается в сторону процесса постоянного контроля и анализа результатов регистрации событий безопасности информации с целью выявления нарушений безопасности информации, угроз безопасности информации и уязвимостей в информационных (автоматизированных) системах [9].

В связи с этим появляется необходимость учитывать следующие особенности, которые встречаются при сборе и анализе данных.

Проблема неоднородности данных состоит в том, что события из журналов безопасности собираются с различных объектов информатизации и бывают различных форматов и различного качества. Для дальнейшего анализа данных требуется приведение данных в структурированный, однородный вид, пригодный для анализа. Чем больше данных о свойствах объекта поддерживает метод кластеризации, тем лучше он применим для системы мониторинга. В зависимости от контекста входных данных одинаковые данные из различных источников могут изменять свой смысл. Требуется оценить: необходима ли контекстная информация и насколько полной она должна быть.

Временные свойства могут варьироваться от мгновений до интервалов, тогда как свойство взаимосвязанности объектов может содержать зависимости как в рамках одного источника событий, так и нескольких. При этом, учитывая специфику работы центров управления информационной безопасности, должна быть возможность обработки большого потока данных в режиме, близком к реальному времени, чтобы своевременно реагировать на инциденты информационной безопасности и не допустить наступления критических событий, которые повлекут за собой остановку процессов предприятия.

Также требования к алгоритмам кластеризации будут отличаться в зависимости от того, в какой момент времени потребуется производить анализ. Должна иметься возможность работы с большим объемом исторических данных для проведения ретроспективного анализа и возможность проведения анализа в режиме, близком к реальному времени. Поскольку методы кластеризации, предназначенные для онлайн-анализа, часто направлены на получение результата также в режиме, близком к реальному времени, то алгоритмы интеллектуального анализа, построенные на основе таких методов, менее подходят для задач конфигурации, где время вычислений играет меньшую роль, а на первое место выходит точность результатов.

Помимо требований, упомянутых выше, которые детализируют характер входных данных, поступающих в систему мониторинга, требуется также учитывать цели, для которых необходимо анализировать данные. В частности, с помощью методов кластеризации необходимо определять параметры со схожими характеристиками для дальнейшей возможности, связанной с корреляцией данных.

Исходя из специфики центров управления ИБ и систем мониторинга в целом, ниже выделены основные критерии выбора алгоритма:

- агрегация данных с минимальной возможной нагрузкой на каналы связи. При первичном анализе данных алгоритм должен объединять данные для дальнейшего их «облегчения» и уменьшения нагрузки на каналы связи, с помощью которых данные передаются в централизованное хранилище;
- поддержка разных типов входных данных;
- визуализация данных;
- обнаружение аномалий;
- поддержка анализа распределенных данных;
- масштабирование больших объемов данных;
- поддержка анализа, приближенного к реальному времени, и адаптация к данным при изменении среды.

### Обзор методов кластеризации

Кластеризация позволяет решать практические задачи обеспечения информационной безопасности, такие как классификация инцидентов информационной безопасности.

Конечной целью кластеризации является получение содержательных сведений о структуре исследуемых данных, что обычно является начальным этапом их более детального анализа.

Алгоритмы кластеризации можно классифицировать по нескольким категориям [10–11].

### Иерархические алгоритмы

Иерархические алгоритмы кластеризации направлены на создание иерархии вложенных разбиений исходного множества объектов. Алгоритмы имеют в основном высокие требования по памяти и по времени, что делает их слишком медленными даже для средних наборов данных.

Результатом работы иерархического алгоритма является схема – дендрограмма, показывающая, в какой последовательности происходило слияние объектов в кластер/разделение объектов на кластеры.

Основные иерархические алгоритмы с их достоинствами и недостатками представлены в табл. 1.

Таблица 1

Иерархические алгоритмы

Наименование алгоритма	Преимущества	Недостатки
<b>CURE</b>	устойчив к выбросам; применим к большим наборам данных; способен находить кластеры различной формы	игнорирует информацию о взаимосвязи объектов в двух кластерах
<b>BIRTH</b>	подходит для больших данных; линейно масштабируемый: качественно кластеризует данные за одну итерацию и улучшает при дополнительных итерациях	чувствительность к наборам данных; работает только с числовыми данными
<b>ROCK</b>	устойчив к выбросам; применим к большому набору данных	сложность пространства зависит от инициализации локальных скоплений
<b>WKMS</b>	низкая вычислительная стоимость; эффективнее, чем K-средних; устойчив к шуму	невозможно кластеризовать данные с различной плотностью

### Неиерархические алгоритмы

При большом наборе данных применяется семейство неиерархических методов кластерного анализа. Данные алгоритмы основаны на итеративном методе дробления исходной выборки данных на определённое количество кластеров. Существуют два подхода дробления:

- определение границ кластеров как наиболее плотных участков в многомерном пространстве исходных данных;
- минимизация меры различия объектов.

### Алгоритмы разделения

Алгоритмы неиерархического разделения осуществляют декомпозицию набора данных, состоящего из  $n$  наблюдений на кластеры  $C_k$  с заранее неизвестными параметрами. При этом требуется найти центры кластеров, назначить объекты ближайшему центру кластера и минимизировать квадраты расстояний.

При работе с данными алгоритмами сложно предсказать оптимальное количество центроидов, также алгоритмы разделения имеют чувствительность к масштабируемости – нормализация данных имеет большое влияние на результат.

Основные алгоритмы разделения с их достоинствами и недостатками представлены в табл. 2.

Таблица 2

Алгоритмы разделения

Наименование алгоритма	Преимущества	Недостатки
<b>К-средних</b>	прост в реализации; один из популярных алгоритмов кластеризации	чувствительный к выбросам в данных; чувствителен к начальной конфигурации выбора количества кластеров
<b>PAM</b>	устойчив к выбросам в данных; эффективен для малых объёмов данных	необходимо предопределить кластер; не эффективен для средних и больших наборов данных
<b>CLARA</b>	применим для больших объёмов данных	чувствителен к выбросам
<b>CLARANS</b>	эффективно обрабатывает выбросы	скорость вычисления

### Плотностные алгоритмы

Плотностные алгоритмы кластеризации, решают проблемы разбиения данных на кластеры произвольной формы.

Основная идея алгоритмов заключается в том, что в каждой точке заданного радиуса (кластера) плотность точек выше, чем за пределами данного радиуса, а также плотность в окрестностях с шумом ниже плотности любого из кластеров. Пределы задаются пороговыми значениями.

Основные плотностные алгоритмы с их достоинствами и недостатками представлены в табл. 3.

Таблица 3

## Плотностные алгоритмы

Наименование алгоритма	Преимущества	Недостатки
DBSCAN	способен обнаруживать и обрабатывать кластеры произвольных форм и размеров; не требуется априорное вычисление количества кластеров; способен идентифицировать шумы и выбросы в данных	задача построения пространственного индекса требует много времени; неэффективен при работе с многомерными данными; сложность в установлении начальных значений <i>Ips</i> , <i>MinPts</i> ; при неизменности выборки данных возникают трудности в настройке этих параметров
OPTICS	подходит для наборов данных с большим объемом шума; скорость в вычислении; непараметрический алгоритм, который не требует входных параметров	необходимо большое количество параметров данных; в силу своей нелинейности хорошо обрабатывает небольшие и средние наборы данных
DENCLUE	подходит для наборов данных с большим объемом шума; наиболее эффективен в обнаружении кластеров различной формы	требуется большое количество параметров
RDBC	эффективно справляется с шумом; результаты намного лучше, чем при использовании DBSCAN	вариативная стоимость вычисления кластеров

**Выводы**

Подводя итог, отметим, что ни один из рассмотренных подходов не удовлетворяет всем критериям, вытекающим из особого характера данных в системах управления ИБ на оборонно-промышленных предприятиях. Пространственная и временная протяженность, а также циклические временные закономерности не учитываются в методах кластеризации.

Также нечеткие входные данные не обрабатываются в преобладающем числе случаев, и только несколько методов могут справиться с данной задачей в режиме реального времени.

В дальнейших исследованиях предлагается преобразовать входные данные для применения методов кластеризации, рассмотренных в приведенном анализе.

**Список литературы**

1. Васильев В.И., Шарабыров И.В. Обнаружение атак в локальных беспроводных сетях на основе интеллектуального анализа данных // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – №2 (151). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obnaruzhenie-atak-v-lokalnyh-besprovodnyh-setyah-na-osnove-intellektualnogo-analiza-dannyh> (дата обращения: 09.01.2022).
2. Бодянский Е.В., Волкова В.В., Егоров А.С. Кластеризация массивов текстовых документов на основе адаптивной нечеткой самоорганизующейся нейронной сети // Радиотехника, информатика, управления. – 2009. – №1 (20). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/klasterizatsiya-massivov-tekstovyyh-dokumentov-na-osnove-adaptivnoy-nechetkoj-samoorganizuyusheysya-neyronnoy-seti> (дата обращения: 09.01.2022).
3. Kandakatla, Mahesh & Reddy, Lokanatha C. & Bansal, Dr. (2014). A Survey on Cluster Techniques for Purpose Oriented Data Mining. [www.ijitech.org](http://www.ijitech.org). 02. 0319-0324 (дата обращения: 09.01.2022).
4. Kaur, Maninderjit & Garg, Sushil. (2014). Survey on Clustering Techniques in Data Mining for Software Engineering. International Journal of Advanced and Innovative Research. 3. 238-243 (дата обращения: 09.01.2022).

5. Аникин И.В. Технология интеллектуального анализа данных для выявления внутренних нарушителей в компьютерных системах // Информатика, телекоммуникации и управление. – 2010. – №6 (113). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologiya-intellektualnogo-analiza-dannyh-dlya-vyyavleniya-vnutrennih-narushiteley-v-kompyuternyh-sistemah> (дата обращения: 09.01.2022).
6. Булдакова Т.И., Джалолов А.Ш. Выбор технологий Data Mining для систем обнаружения вторжений в корпоративную сеть // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – №11 (23). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vybor-tehnologiy-data-mining-dlya-sistem-obnaruzheniya-vtorzheniy-v-korporativnuyu-set> (дата обращения: 09.01.2022).
7. Актаева А.У., Ниязова Р., Гагарина Н., Бижигитова Д., Кусаинова У., Даутов А., Шатенова Г. Искусственные интеллектуальные системы для обнаружения вторжений: перспективы развития инновационных технологий // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2017. – №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/iskusstvennye-intellektualnye-sistemy-dlya-obnaruzheniya-vtorzheniy-perspektivy-razvitiya-innovatsionnyh-tehnologiy> (дата обращения: 09.01.2022).
8. Добкач Л.Я. Анализ методов распознавания компьютерных атак // Правовая информатика. – 2020. – №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-metodov-raspoznavaniya-kompyuternyh-atak> (дата обращения: 09.01.2022).
9. Полтавцева М.А. Модель активного мониторинга как основа управления безопасностью промышленных киберфизических систем // Вопросы кибербезопасности. – 2021. – №2 (42). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/model-aktivnogo-monitoringa-kak-osnova-upravleniya-bezopasnostyu-promyshlennyh-kiberfizicheskikh-sistem> (дата обращения: 11.01.2022).
10. Ершов К.С., Романова Т.Н. Анализ и классификация алгоритмов кластеризации // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. – 2016. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-i-klassifikatsiya-algoritmov-klasterizatsii> (дата обращения: 09.01.2022).
11. Anand Khandare, Anand Khandare Data Clustering Algorithms: Experimentation and Comparison // Intelligent Computing and Networking, Proceedings of IC-ICN 2021 (дата обращения: 10.01.2022).



## **Автоматизация учёта объектов интеллектуальной собственности в рамках развития системы управления знаниями научно-исследовательской организации**

**Н.В. Кирсанов**<sup>2</sup>, к.т.н. О.В. Ульянин<sup>1,2</sup>, д.т.н. Е.М. Абакумов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ – Москва, Россия;

<sup>2</sup> ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова» – Москва, Россия

В докладе представлены результаты автоматизации процесса внутреннего учёта объектов интеллектуальной собственности (ОИС) для оперативности получения достоверной информации. В результате решения задачи автоматизации сокращено время обработки данных об ОИС, созданы базы данных и поисковые сервисы, позволяющие использовать информацию об ОИС в системе управления знаниями научно-исследовательской организации.

## **Automation of Accounting of Intellectual Property Objects within the Framework of the Development of the Knowledge Management System of a Research Organization**

**N.V. Kirsanov**<sup>2</sup>, PhD O.V. Ulianin<sup>1,2</sup>, Dr. E.M. Abakumov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute) – Moscow, Russia;

<sup>2</sup> FSUE Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA) – Moscow, Russia

The report presents the results of automation of the process of internal accounting of intellectual property objects for the efficiency of obtaining reliable information. As a result of solving the automation problem, the processing time of information about the IPO has been reduced, databases and search services have been created that allow using information about the IPO in the knowledge management system of a research organization.

В результате принятия государственных стратегий по цифровизации и импортозамещению перед отраслевыми НИИ встали новые задачи, а также появились новые возможности сопровождения и поддержки научной деятельности в рамках управления научно-технической информацией. Для решения поставленных государством задач необходимо провести анализ, направленный на констатирование нынешних результатов и обозначение будущих возможностей развития по заданному стратегиями курсу.

На текущий момент цифровизация в зоне ответственности отдела патентных исследований и научно-технической информации (ОПИНТИ) ФГУП «ВНИИА» существует в научно-технической библиотеке (НТБ). Однако при динамичном развитии системы обеспечения НТИ зона ответственности расширяется и начинает базироваться не только на деятельности НТБ, но и на процессах сопровождения научной и производственной деятельности. К ним можно отнести формирование и управление массивами данных о публикационной активности, научной и изобретательской деятельности. В результате пользователю предоставляется наиболее полная информация по расширенному спектру вопросов. Таким образом, формируется понимание дальнейшего развития ОПИНТИ ФГУП «ВНИИА».

В данном докладе речь пойдёт о данных, составляющих одну из частей жизненного цикла результатов интеллектуальной деятельности (РИД) – информации об ОИС.

С одной стороны, при патентных исследованиях средством исследования являются инструменты информационных ресурсов НТБ, входящей в состав ОПИНТИ, а также баз данных (БД) сопровождения жизненного цикла РИД, содержащие информацию о побочных материалах, полученных при создании РИД, и служебные БД подразделений. С другой стороны, при обеспечении жизненного цикла РИД информация о РИД становится предметом анализа, обобщения, обработки в БД сопровождения жизненного цикла РИД и БД НТБ [1] для того, чтобы превратиться в объект учёта, то есть в ОИС.

В начале автоматизации любого процесса формулируется цель – его оптимизация в широком смысле, а ожидаемыми результатами, в основном, становятся сокращение времени обработки тех или иных данных, контроль достоверности, сведение к минимуму человеческого фактора и т.п.

В нашем случае цель в узком смысле – интеграция учёта ОИС посредством его автоматизации сначала в цифровую среду, а затем – в систему обеспечения НТИ. Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач – создать БД, описать процессы обработки информации об ОИС, определить возможность интеграции. На данный момент решена первая задача – произведена регистрация в Роспатент и осуществлён запуск в промышленную эксплуатацию БД «Объекты интеллектуальной собственности» (БД «ОИС»). Это позволило отказаться от ряда регистрационных журналов, что привело к более оперативному доступу к служебной информации об ОИС, а также создать поисковый сервис для работников ВНИИА.

Решение задачи описания процессов обработки информации об ОИС обусловлено необходимостью оптимизации времени обработки данных посредством расширения функциональных возможностей БД «ОИС». Благодаря проведённой работе удалось достичь значительного сокращения времени обработки данных по ряду процессов. Например, процесс актуализации сведений о годах поддержания в силе патентов сократился более чем в 80 раз. При этом увеличилась достоверность данных и снизился риск ошибок из-за человеческого фактора.

Результат был достигнут посредством внедрения функциональных расширений в БД «ОИС», которые были разработаны после практических исследований по затратам времени на операции. Исследования представляли собой хронометраж последовательности действий сотрудника при осуществлении процедуры актуализации сведений о годах поддержания в силе патентов в ручном режиме и автоматическом режиме исходя из среднего количества позиций, подлежащих обработке.

Такой результат стал возможен в результате внедрения в процессе описания процессов обработки информации об ОИС функциональных расширений в виде автоматических пакетных обработок в БД «ОИС». Однако данное решение не обошлось без внедрения дополнительных модулей – печать выходных форм, служебных БД и пользовательских поисковых сервисов. Таким образом, БД «ОИС» представляет собой служебную полнотекстовую БД (ПБД) для «...хранения и обработки информации об объектах интеллектуальной собственности, ... обеспечивает выполнение следующих функций: хранение перечня объектов интеллектуальной собственности; полнотекстовый поиск по материалам об объектах интеллектуальной собственности; формирование бланков на основе шаблонов для оплаты госпошлины; пакетная актуализация годов поддержания; доступ пользователей к материалам об объектах интеллектуальной собственности...» [2]. В результате совокупность различных надстроек и дочерних БД формально сформировала автоматизированную систему учёта ОИС (АСУ ОИС). Таким образом, мы получили цифровую площадку для служебного использования с перспективой дальнейшей модернизации.

АСУ ОИС представляет собой совокупность произвольных БД, управляемых ТСП/IP-сервером ИРИБИС64+. Данная совокупность представляет собой прототип системы управления жизненным циклом РИД и включает на сегодняшний день две БД – «Объекты интеллектуальной собственности» (БД «ОИС») и «Государственный учёт РИД» (БД «ГУ РИД»).

ОПИНТИ занимается не только патентными исследованиями, но и информационным обеспечением работников ВНИИА, поэтому данные, содержащиеся в АСУ ОИС, должны быть доступны как сотрудникам отдела, так и работникам всего института. Донести эту информацию до работников могут поисковые сервисы на внутреннем портале, что является решением задачи интеграции в систему обеспечения НТИ ВНИИА.

В результате использования АСУ ОИС интеграция процесса учёта ОИС в систему обеспечения НТИ становится возможной и соответствует требованиям к интегрированному решению. Требования, предъявляемые в нашем случае, заключаются в реализации функции сопровождения РИД от момента подачи заявки до получения охранного документа, максимально исключив из него делопроизводство на бумажных носителях, а также в организации доступа к введённой информации в рамках использования одной системы.

В связи с интеграцией процесса в систему обеспечения НТИ появляется возможность предоставления пользователям структурированной информации об ОИС, обусловленной поддержанием высокого уровня информационного сопровождения научной деятельности ФГУП «ВНИИА». Например, в структуре системы обеспечения НТИ процесс учёта ОИС формирует один из фундаментальных фрагментов в числе ранее созданных на основе научно-технических материалов (НТМ) и фонда НТБ. При его интеграции структура системы обеспечения НТИ начинает базироваться на трёх фрагментах: НТМ, ОИС и НТБ. При этом эти фрагменты взаимосвязаны информационно и, как следствие, технологически, дополняя друг друга.

Информационные связи обусловлены жизненным циклом РИД и обеспечивают проследивание формирования РИД практически на всех этапах. Это позволяет получить наиболее полную информационную картину по запрашиваемой тематике. Для обеспечения информационных связей устанавливаются связи технологические, которые реализованы посредством использования служебных инструментов ИРБИС.

В заключение хочется отметить, что интеграция процесса учёта ОИС в систему обеспечения НТИ в качестве пилотного проекта позволила наметить пути её дальнейшего развития и достичь определённых производственных результатов. Например, повысить доступность научно-технической информации для всех категорий пользователей. Также появилась возможность развивать аналитическую составляющую системы обеспечения НТИ как инструмента системы менеджмента качества.

Курс на дальнейшую цифровизацию большинства процессов информационного обеспечения деятельности отраслевого НИИ связан не только с предоставлением информации, но и с её формированием в электронном виде, что говорит о необходимости цифровизации смежных с областью НТИ процессов и интеграцией их в систему обеспечения НТИ.

### Список литературы

1. С.В. Жмайло, О.В. Ульянин. Об одной из моделей библиотеки инновационного предприятия в цифровую эпоху // Книга. Культура. Образование. Инновации : сборник докладов Шестого Международного профессионального форума «Крым-2021» (г. Судак, 5–13 июня 2021 г.) / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Государственная публичная научно-техническая библиотека России. – Москва : ГПНТБ России, 2021 DOI 10.33186/978-5-85638-236-4-2021-96-102.
2. Свидетельство 2021620416. Российская Федерация. Объекты интеллектуальной собственности / Г.Г. Бирюков, Г.Е. Гребенев, Н.В. Кирсанов, Е.Ю. Кожина, О.В. Ульянин, И.В. Харитонов; заявитель и обладатель ФГУП «ВНИИА»: – №2021620325, заяв. 03.03.2021; опубл. 05.03.2021.

## Применение технологий виртуальной и дополненной реальности в образовательном процессе

к.т.н. А.О. Толоконский, **Д.Г. Ковалёнок**

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ – Москва, Россия

В данной статье рассматриваются проблема современного образования и новые подходы к реформированию обучающего процесса. Смысл, назначение и миссия современного образования – не просто получение базовых знаний и необходимых навыков и умений – это выработка культурного кода, самостоятельного подхода к усвоению новых знаний, культурных ценностей, новых форм и видов деятельности [1]. Авторы предлагают использовать виртуальную и дополненную реальность как новый информационный инструмент обучения в современном образовании.

## Use of Virtual Reality and Augmented Reality Technology in the Educational Process

PhD A.O. Tolokonskiy, **D.G. Kovalionok**

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute) – Moscow, Russia

This article addresses the problem of modern education and a new approach to reforming the educational system. The point, the mission of modern education isn't just about getting the basic knowledge and getting the necessary skills and abilities, it is about producing cultural code, it is about the distinct approach for getting knowledge, for understanding something new, for understanding cultural value. The authors suggest using virtual and augmented reality as a new informational tool to study in modern education.

В настоящее время современная система образования требует проведения значительных реформ. Эти реформы должны затрагивать как методы правильного подбора абитуриентов, так и качество их образования. Одной из существенных проблем, встающих на пути у будущего студента, – это выбор специальности и её перспективы. На этой стадии абитуриент не может целиком сформировать своё личное предпочтение в профессии, его выбор формируется не на основании индивидуальных особенностей, а на основании мнения окружающих людей и престижности профессии.

Другой проблемой современного образования является его качество. Зачастую высшее учебное заведение заинтересовано в большом количественном наборе студентов, при этом может теряться качественная составляющая подготовки кадров [2]. А также заинтересованность многих студентов заключается в получении диплома, а не знаний и навыков в соответствующей отрасли. Преподаватели при этом не действуют на опережение, чтобы раскрывать потенциал обучающегося.

Одним их подходов в проведении реформ в образовании является применение технических средств обучения, применение тренажерных комплексов и компьютерных обучающих программ. Также большой интерес представляет использование виртуальных симуляторов для подготовки специалистов в системе высшего образования. Особенность такого вида обучения является максимально полное воспроизведение внешнего вида устройств и элементов их управления [3]. При обучении студент имеет возможность заниматься с моделью реального объекта и выполнять имитацию технологических операций без вмешательства других обучаемых. Такой

подход вырабатывает психологическую устойчивость, воспитывает самостоятельность при принятии решений в случае возникновения внештатных экстремальных ситуаций [7].

Создание виртуальных симуляторов требует разработки учебно-тренажерных средств с использованием технологий виртуальной реальности, а также алгоритма, который обеспечит программирование конкретной задачи [3]. Виртуальная реальность представляет собой набор программно-аппаратных средств, которые предоставляют возможность воспроизводить искусственный мир и транслировать его в сознание пользователя через воздействие на органы чувств (зрение, слух, тактильные ощущения, положение в пространстве). Использование этой технологии предоставляет инструменты взаимодействия с объектами, которые в ней находятся (интерактивность), в отличие от видеокадрового контента, где конечный пользователь является пассивным наблюдателем.

Использование виртуальной и дополненной реальности имеет смысл, когда альтернативные методы являются трудновыполнимыми, неэффективными или затратными. Кроме того, существует еще несколько аргументов в пользу использования VR/AR-технологий в образовании.

С появлением компьютерных технологий и виртуальной реальности стали возможны моделирование и разработка различных тренажерных систем. Изначально компьютерная графика использовалась для проектов в кино и игровой индустрии. На этом этапе уже появляются первые компьютерные модели человека. Развитие этих технологий позволяет создавать трехмерные модели и виртуальную реальность для ядерной энергетики. Виртуальная реальность дает возможность создавать компьютерные тренажеры для подготовки обслуживающего персонала АЭС. В своем большинстве проектируются виртуальные блочные пункты управления (БПУ), которые предоставляют возможность организовать человеко-машинный интерфейс (ЧМИ), автоматизировать рабочие места и провести коммуникацию оперативного персонала АЭС [7].

В ядерной энергетике также создаются виртуальные энергоблоки АЭС, которые помогают решать задачи на этапе проектирования станций с реактором типа ВВЭР и БН. Виртуальные энергоблоки, как правило, состоят из суперЭВМ, программного обеспечения и пульта управления [4]. С помощью виртуального пульта управления предоставляется возможность моделировать все ситуации, которые происходят на площадке АЭС, проверять динамические процессы в основных технологических и электротехнических системах и системах автоматики. Пользователь может перемещаться по макету, изменять масштабирование, просмотреть площадку АЭС и прилегающую к ней территорию, войти внутрь сооружений и увидеть составляющие оборудования. На стадии проектирования АЭС возможно анимировать объекты, задавать им любое поведение. Технология виртуальной реальности используется в компьютерных тренажерах ремонтных процессов в учебно-тренировочных центрах АЭС для подготовки персонала обслуживания сложного технологического оборудования [2].

Виртуальные пульта как правило создаются с помощью программ виртуального моделирования, при этом моделируется воздействие оператора на элементы управления, движение этих элементов в результате воздействия, создание и расчет функциональной схемы пульта управления.

Применение виртуальной реальности в ядерной энергетике за последние несколько лет достаточно возросло. Использование возможностей трехмерного моделирования для проверки проектных решений является актуальной задачей.

Область применения трехмерных моделей и виртуальной реальности в ядерной энергетике за последние десять лет активно развивается. Использование возможностей трехмерного моделирования для проверки проектных решений новых и существующих БПУ АЭС является актуальной задачей [4].

На рис. 1 приведен пример модели БПУ АЭС, созданной в Blender 3D. Полученная модель не является статичной картинкой, в ней реализован вид «от первого лица» в положении сидя и стоя, по помещению можно свободно передвигаться в любом направлении, как в компьютерной игре.



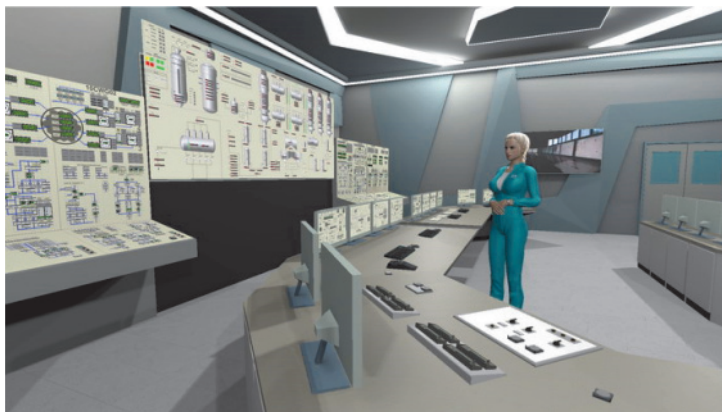


Рис. 1. Пример вида БПУ при проектировании освещения

Безопасность ядерных объектов является серьезной задачей для Международного агентства по атомной энергии. МАГАТЭ дает рекомендации относительно контроля и безопасности радиоактивных материалов на ядерных объектах. В связи с этим регулярно проводятся различные тренинги и симуляции на ядерных объектах.

Обучение, которое проводится в этой области, может включать различные риски радиоактивного заражения, что может сказаться на здоровье обучаемого. Инженеры из Политехнического университета Валенсии разработали обучающую систему на основе виртуальной реальности, которая включает в себя разработку виртуального радиоактивного пространства, ядерных энергетических установок и виртуального аватара. Эта обучающая система позволит обучать операторов ядерных установок, имитировать операции по перегрузке топлива, дает возможность отображать распределение мощности дозы на определенном участке [6].

Была разработана виртуальная модель вымышленного ядерного объекта. С помощью инструментов были заданы расстояния, размеры и пропорции зданий и сооружений, которые используются при создании трехмерной модели. С помощью Autodesk 3D Max были разработаны модели зданий, приближенные к реальным ядерным сооружениям, для того чтобы обеспечить лучшее погружение (рис. 2).

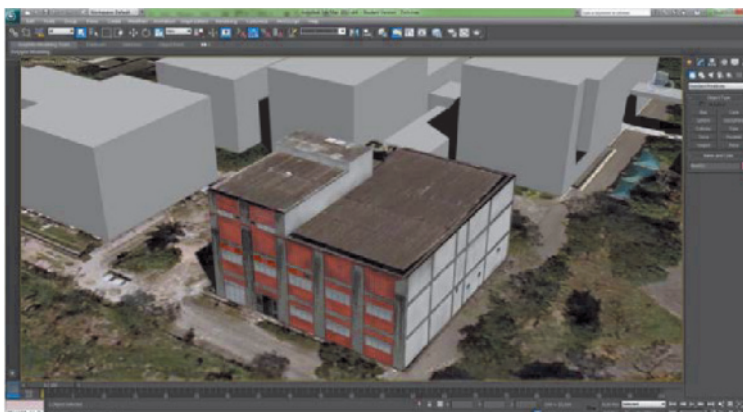


Рис. 2. Моделирование радиоактивного объекта в Autodesk 3DS MAX

Моделирование детектора излучения производилось на основе реальных датчиков. Для этой цели были сделаны замеры размеров и пропорций реального дозиметра Соэкс Quatum, который предназначен для измерения накопленной радиационной дозы и оценки уровня радиоактивного фона.



Для представления радиоактивных источников использовались символические маркеры в виртуальной среде, так как реальные источники не имеют определенной визуальной идентификации. Маркеры в данной работе выглядят в виде цветных кубов, которые расположены в разных точках сцены.

С помощью программы визуализации Unity 3D была создана виртуальная среда, в которой выполнялась данная симуляция. В этой среде был виртуально смоделирован радиоактивный объект и персонажи (аватары), взаимодействующие с окружающей средой (рис. 3). Смоделированные объекты импортировались из Autodesk 3Ds Max, осуществлялись программирование радиоактивных источников и работа виртуальных дозиметров.



Рис. 3. Представление радиоактивного участка в Unity 3D

Радиоактивные источники были разбросаны в нескольких местах в виртуальной среде, что позволяло персонажам с дозиметром иметь возможность обнаруживать эти источники и определять их интенсивность. Также был проведен сценарий симуляции, когда персонаж перемещался по виртуальной среде с радиоактивным источником, и таким образом можно было проверить работу стационарных дозиметров, которые выявляли увеличение радиоактивности в окрестностях.

### Список литературы

1. Андрушко Д.Ю. Применение технологий виртуальной и дополненной реальности в образовательном процессе: проблемы и перспективы / Д.Ю. Андрушко // Научное обозрение. Педагогические науки – 2018. – №6. – С. 5–10.
2. Гуреев М.В. Скользкие грани современной системы образования в России. Проблемы Высшей Школы [Электронный ресурс] / М. В. Гуреев // Психология, социология и педагогика. – 2012. – №5. – С. 571.
3. Коженков, А.О. Виртуальные симуляторы специальной техники в системе высшего образования / А.О. Коженков // Фундаментальные исследования. – 2015. – №12. – С. 278–282.
4. Ковалёнок Д.Г. Применение технологий виртуальной и дополненной реальности в образовательном процессе / Д.Г. Ковалёнок // Автоматизированные системы управления технологическими процессами АЭС и ТЭС: материалы II Междунар. науч.-тех. конф. – Минск: БГУИР, 2021. – С. 268–273.
5. Соболев В.Ю. Интерактивные методы обучения как основа формирования компетенций / В.Ю. Соболев, О.В. Киселева // Высшее образование сегодня. – 2014. – №9. – С. 70.
6. Dimiter V. Virtual Reality Challenges in Education and Training. International / Z. Plamena Zlateva, Dimiter V. // Journal of Learning and Teaching. – 2017. Vol. 3. P 33–37.
7. Гришкун А.В. Об эффективности использования технологий дополненной реальности при обучении школьников информатике / А.В. Гришкун // Вестник Московского городского педагогического университета: Серия «Информатика и информатизация образования». – 2016. – №5. – С. 98–103.

## Система автоматического позиционирования световода диагностики «Активная спектроскопия»

**А.В. Кудрявцев**, С.Н. Груздев, Ю.А. Парышкин, А.Б. Рахматулин

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ - Москва, Россия

Рассматриваются результаты разработки алгоритмов автоматического позиционирования световода в диагностике ИТЭР «Активная спектроскопия» в «оптимальное» состояние при имеющихся ограничениях блока позиционирования, а также результаты тестирования разработанных алгоритмов на макете системы управления с использованием реального оборудования и программного обеспечения, которое заложено в проекте системы.

## The System of Automatic Positioning of CXRS Edge Diagnostic Light Guide

**A.V. Kudryavtsev**, S.N. Gruzdev, Y.A. Paryshkin, A.B. Rahmatulin

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute) - Moscow, Russia

The results of the development of algorithms for automatic positioning of the light guide of the CXRS Edge Diagnostic of ITER to the "optimal" state under the existing limitations of the positioning unit, as well as the results of testing the developed algorithms with the help of a control system mockup using real equipment and software that is embedded in the system design, are considered.

В диагностике измеряется оптическое излучение, которое возникает при взаимодействии ядер легких примесей в плазме с инжектированным в плазму диагностическим пучком атомов водорода. Свет, порождаемый при таком взаимодействии, при помощи системы линз и зеркал (оптического коллектора) проецируется на вход оптоволоконного световода и далее по световоду поступает на входы специальных спектрометров. Входной конец световода установлен на специальном приспособлении для позиционирования его относительно светового изображения, получающегося на выходе оптического коллектора. Настройка на световое изображение (световое пятно) осуществляется перемещением входного конца световода вдоль трех пространственных осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  и поворотом вокруг оси  $Z$ .

Предполагается, что видимое изображение плазменного шнура имеет вид прямоугольника, размерами приблизительно  $\sim 70 \times 20$  мм, как показано на рис. 1. Распределение световой интенсивности вдоль оси  $Y$  близко к распределению Гаусса. Распределение световой интенсивности по оси  $X$  практически равномерно со спадом по краям прямоугольника.

Входной наконечник световода выполнен в виде набора щелей (рис. 1), поэтому изображение плазменного шнура оказывается «нарезанным» вдоль радиуса плазменного тора на 26 пространственных каналов, соответствующих различным пространственным частям плазмы.

Позиционирование конца световода относительно изображения плазменного шнура должно осуществляться таким образом, чтобы обеспечить максимальную интенсивность «активного» (то есть связанного с диагностическим пучком) светового сигнала в области щелей («идеальное» состояние).

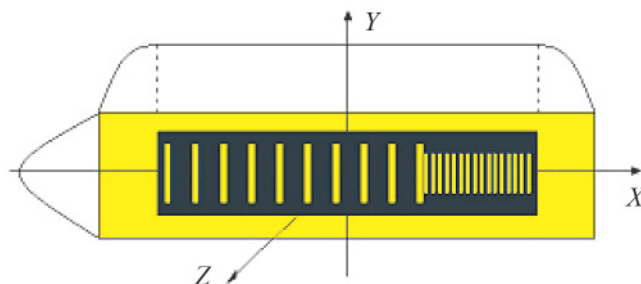


Рис. 1. «Идеальное» расположение конца световода относительно изображения плазменного шнура

Исходной информацией для оценки световой интенсивности являются 26 спектров излучения, зарегистрированных в одном спектральном диапазоне. В качестве информационного признака о величине световой интенсивности может использоваться либо значение интегральной интенсивности спектра, либо значение заранее выбранного пика в спектре.

Блок позиционирования конструктивно представляет собой платформу, перемещение которой в пространстве осуществляется с помощью шаговых двигателей и имеет следующие технические характеристики:

- диапазон линейного перемещения по осям  $X, Y, Z$ :  $\pm 10$  мм, точность установки 0,05 мм;
- диапазон углового перемещения  $\alpha$  вокруг оси  $Z$ :  $\pm 10^\circ$ , точность установки 0,05°.

Было показано, что разработка алгоритма перемещения конца световода из произвольного состояния в «идеальное» при указанных ограничениях блока позиционирования представляет собой математическую задачу оптимизации и сводится к нахождению экстремума целевой функции. В нашем случае величина экстремального параметра является функцией четырех независимых друг от друга параметров  $(x, y, z, \alpha)$ , и поэтому следует использовать многомерные методы оптимизации. Так как использование производной целевой функции в нашем случае является довольно затруднительным, было предложено использовать прямой метод решения задачи оптимизации, в котором не требуется дифференцируемости целевой функции, и она не должна обязательно быть задана аналитически, а именно метод многомерной оптимизации Гаусса-Зейделя. В этом методе для поиска экстремума по одному параметру при поочередном изменении всех параметров было предложено использовать метод сканирования, как наиболее простой.

Для решения задачи рассмотрено два вида целевых функций. Пусть

$I_{imax}$  – максимальная световая интенсивность на изображении светового пятна, соответствующая  $i$ -ому пространственному каналу;

$I_i(x, y, z, \alpha)$  – измеренная световая интенсивность на изображении светового пятна в  $i$ -ом пространственном канале при координатах блока позиционирования  $x, y, z, \alpha$ ;

$\Delta I_i = [I_{imax} - I_i(x, y, z, \alpha)] / I_{imax}$  – относительное отклонение измеренной интенсивности от максимальной;

$n$  – число пространственных каналов.

Целевая функция  $F_1$  рассчитывается как среднеквадратичное отклонение  $\Delta I_i$  по всем пространственным каналам:

$$F_1(x, y, z, \alpha) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta I_i^2}{n}}.$$

Целевая функция  $F_2$  рассчитывается как средняя суммарная интенсивность по всем пространственным каналам:

$$F_2(x, y, z, \alpha) = \frac{\sum_{i=1}^n I_i}{n}.$$

Были разработаны стратегии поиска экстремума целевых функций  $F_1$  и  $F_2$  методом сканирования, а также стратегия поиска экстремума целевой функции  $F_2$  методом оценки градиента ( $F_2$ -grad).

Проверка разработанных алгоритмов автоматического позиционирования была проведена на модели системы позиционирования. В качестве модели источника света использовалось световое пятно, сформированное на экране графического цветного RGB-индикатора. В качестве модели спектрометрических каналов использовались точечные датчики освещенности типа ВН1750. В качестве устройства позиционирования датчиков освещенности относительно светового пятна использовалось лабораторное устройство перемещения на базе шаговых двигателей. Элементы модели системы позиционирования показаны на рис. 2.

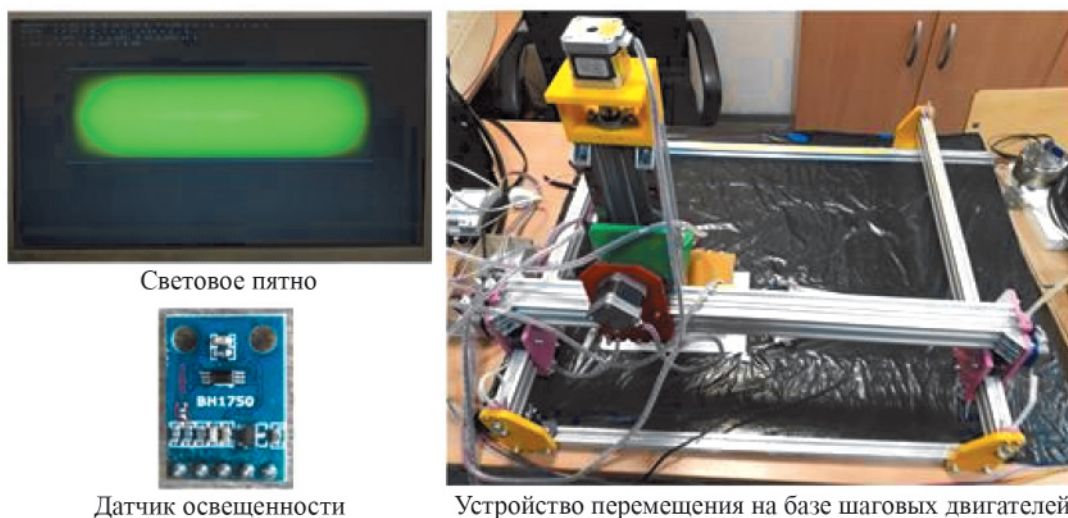


Рис. 2. Элементы модели системы позиционирования

Были рассмотрены несколько способов построения светового пятна в зависимости от функции изменения яркости. В качестве примера на рис. 3 показана реализация синусоидальной функции изменения яркости.

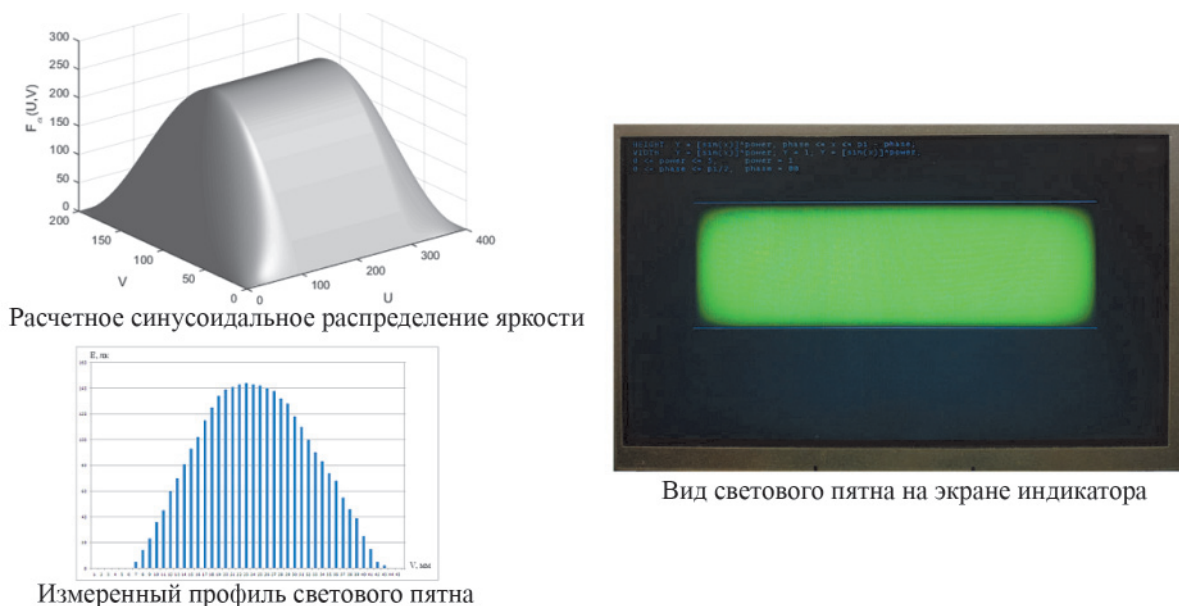


Рис. 3. Синусоидальная функция изменения яркости светового пятна



На базе датчиков освещенности была создана упрощенная модель входного конца световода, как показано на рис. 4. Данная модель содержит линейку из восьми датчиков освещенности. Такое количество было выбрано для того, чтобы вписаться в габариты модели светового пятна.

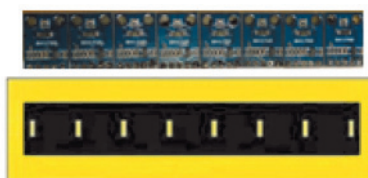


Рис. 4. Модель входного конца световода

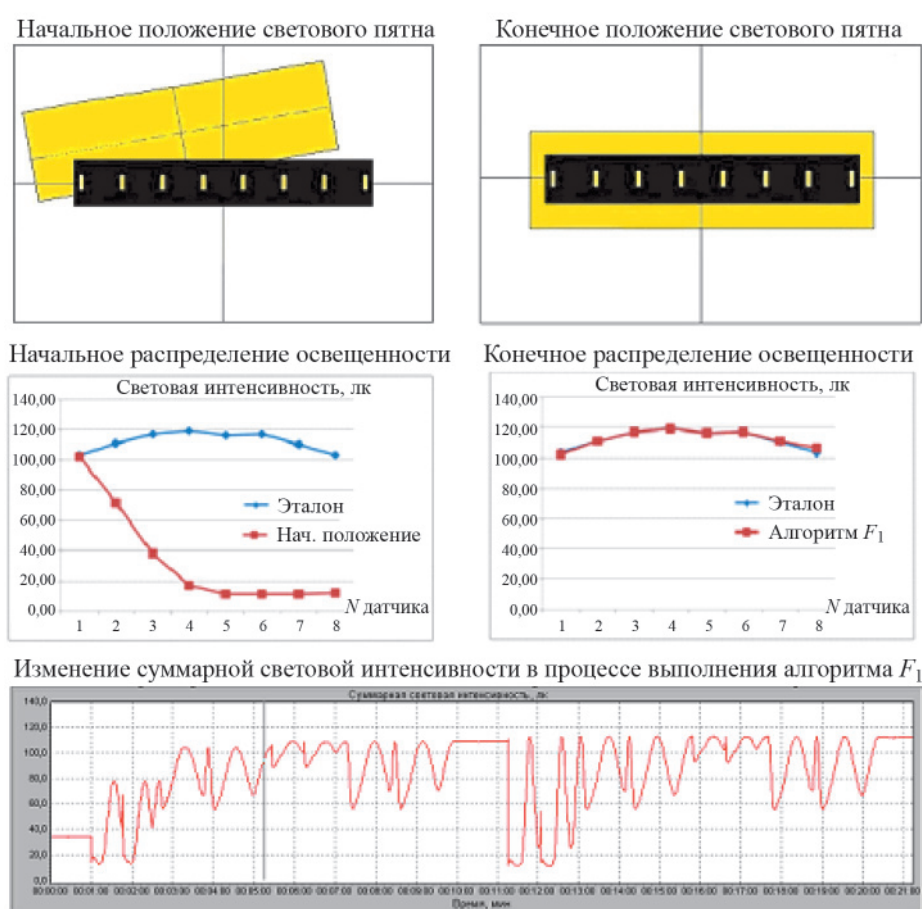


Рис. 5. Результаты тестирования алгоритма  $F_1$

Разработанные алгоритмы были протестированы на макете системы управления с использованием реального оборудования и программного обеспечения, которое заложено в проекте системы [1].

Тестирование алгоритмов проводилось следующим образом. Сначала световое пятно вручную устанавливалось относительно линейки датчиков таким образом, чтобы получить «идеальное» распределение освещенности. Показания датчиков при «идеальном» распределении в дальнейшем использовались в качестве эталона. Далее имитировались наиболее «проблемные», с точки зрения ограничений устройства позиционирования, варианты смещения светового пятна относительно линейки датчиков, и из этих положений запускалось выполнение



алгоритма автоматического позиционирования. Всего было рассмотрено восемь вариантов смещения светового пятна. Все они выполнялись по однотипной схеме: смещение на расстояние  $\pm 10$  мм по оси  $X$  с одновременным смещением на расстояние  $\pm 10$  мм по оси  $Y$  и одновременным поворотом на угол  $\alpha$  вокруг оси  $Z$  на  $\pm 10^\circ$ . Для каждого варианта смещения светового пятна были протестированы алгоритмы поиска экстремума целевых функций  $F_1$ ,  $F_2$  и  $F_2$ -grad.

В качестве примера на рис. 5 приведены результаты тестирования алгоритма  $F_1$  для одного из вариантов смещения светового пятна.

По результатам проведенного тестирования на модели был сделан вывод о том, что разработанные алгоритмы являются работоспособными и могут быть использованы на дальнейших этапах работы по разработке устройства позиционирования входного торца световода. Ошибка позиционирования по критерию максимума суммарной световой интенсивности для данной модели не превышает 0,5%. Максимальная относительная ошибка настройки на «эталонное» распределение световой интенсивности не превышает 5%. Алгоритм  $F_2$  состоит из меньшего числа конечных состояний и в целом выполняется быстрее, чем алгоритм  $F_1$ . В условиях значительной начальной неопределенности распределения световой интенсивности лучше применять алгоритмы  $F_1$  и  $F_2$ , использующие метод сканирования. Алгоритм  $F_2$ -grad может быть применен в качестве «слеящего» после отработки алгоритмов  $F_1$  и  $F_2$ .

Работа выполнена при финансовой поддержке Частного учреждения «Проектный центр ИТЭР» в рамках договора № 17706413348210001850/28-21/01 от 02.06.2021г.

### Список литературы

1. I&C System Design Specification (R2SYLC). <https://user.iter.org/?uid=R2SYLC>.

## Система сбора и обработка данных вихретокового контроля с использованием сигнальных процессоров

**А.И. Максимкин**, Е.Г. Белендрясова, к.т.н. Б.Ф. Ануфриев, к.соц.н. А.В. Берестов

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ – Москва, Россия

Методы неразрушающего контроля широко используются во всех отраслях промышленности, в том числе в атомной. Это связано с тем, что объект контроля не подвержен повреждающему воздействию извне, может несколько раз проходить операции контроля и может в дальнейшем использоваться по назначению. В работе рассматривается вихретоковый метод контроля применительно к оболочкам твэл из аустенитной стали, который, в свою очередь, очень чувствителен к помехам. Шумовые составляющие сигнала присутствуют в любых системах измерения. Эти компоненты препятствуют обнаружению определенных типов дефектов внутри объектов контроля. Наиболее полезным решением являются специальные аппаратные фильтры, а компактность современных электронных компонентов позволяет создавать электронные фильтрующие блоки очень малых размеров, однако любое изменение параметров фильтра в конструкции приводит к изменению схемных решений. Использование цифровых сигнальных процессоров помогает избежать этих проблем.

## Data Acquisition and Processing System in an Eddy Current Inspection with Use of Digital Signal Processors

**A.I. Maximkin**, E.G. Belendryasova, PhD B.F. Anufriev, PhD A.V. Berestov

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute) – Moscow, Russia

Non-destructive testing methods are widely used in all industries, including the nuclear industry. That's because the object of control isn't been damaged, it can be controlled several times and can be further used for its intended purpose. The paper considers the eddy current testing method of control applied to fuel rod claddings made of austenitic steel, which is very sensitive to interference. Noise signal components are present in any measurement systems. These components prevent the detection of certain types of defects inside the controlled objects. The most useful solution is special hardware filters, and the modern miniaturized electronic components allows to create them, however, any change in the filter parameters leads to changes in circuit. The use of digital signal processors helps to avoid these problems.

Вихретоковый контроль – вид неразрушающего контроля, основанный на анализе взаимодействия внешнего электромагнитного поля с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в металле объекта контроля этим полем [1]. Индуцируемые токи определяются по известной формуле:

$$I_x = I_0 \cdot e^{-x(\pi f \mu \sigma)}, \quad (1)$$

где  $I_0$  – плотность вихревых токов на поверхности объекта;  $f$  – частота тока возбуждения;  $x$  – глубина, на которой определяют плотность вихревых токов;  $\sigma$  – проводимость материала объекта контроля;  $\mu$  – магнитная проницаемость.

В качестве преобразователя используется торцевая катушка с сердечником, на которую подается переменный ток, и с помощью мостовой схемы снимается отклонение тока в катушке от изначального.

Наличие дефектов в металле влияет на плотность токов, индуцируемых в материале оболочки. Физический принцип вихретокового метода контроля позволяет варьировать зону контроля по глубине проникновения поля, которая определяется, как описано в статье [2], по формуле скин-слоя:

$$f = \frac{1}{(\pi \cdot \mu \cdot \sigma \cdot \delta^2)}. \quad (2)$$

Такой подход позволяет создавать трёхмерную картину дефектов и несплошностей в металле [3].

Работа направлена на разработку и внедрение вихретоковых методов контроля технического состояния оболочек твэлов реакторов типа БН для исследования в режиме экспресс-теста как на этапе производства, так и для послереакторных исследований.

Объектом контроля является оболочка трубчатого твэла реактора на быстрых нейтронах (БН-600). Оболочка изготавливается из аустенитной стали марки ЧС-68 (06X16H15M2ГТФР) диаметром 6,9 мм и толщиной стенки 0,4 мм. Особенности эксплуатации такой стали под облучением подробно описаны в статье [4].

Для проверки и испытания методов и средств диагностики используются два типа тестовых образцов:

- стандартный образец толщины (СОТ);
- стандартный образец дефекта (СОД).

Идентификационные признаки дефектов (амплитуда, полярность, скорость нарастания отклика и др.), полученные с помощью СОД, в дальнейшем используются для расшифровки вихретоковых диаграмм исследуемых оболочек твэлов [5].

Чтобы охватить всю толщину металла оболочки твэла, необходимо обеспечить устойчивую генерацию сигнала и приём ответного сигнала в диапазоне частот от 0,7 до 8,0 МГц. Таким образом, вихретоковым методом можно проводить обнаружение поверхностных трещин внутренней стороны оболочки твэла, что подтверждено экспериментально, однако возникают высокие требования к качеству обработки сигнала.

При реализации системы сбора данных использовался микроконтроллер STM32F373. Особенности этого микроконтроллера являются наличие контроллера DMA (Direct Memory Access – контроллер прямого доступа к памяти) и отдельного DSP процессора (Digital Signal Processor – цифровой сигнальный процессор).

DSP процессор помогает в реализации математических фильтров, быстрого Фурье-преобразования, линейных и нелинейных фильтров, которые важны при обработке измерительной информации. Проведены расчеты необходимых составляющих цифровых фильтров, которые реализованы программно в виде исполняемой микроконтроллером программы.

Для работы установки вихретокового контроля реализована система сбора данных с использованием современных встраиваемых решений на базе микроконтроллеров, персонального компьютера, структурная схема которой представлена на рис. 1.

Передача данных по USB осуществляется с помощью библиотеки STM32F10x, STM32L1xx and STM32F3xx USB full speed device library. Таким образом, микроконтроллер обменивается с ПК по интерфейсу USB с использованием всего доступного функционала и на полной скорости без посредников в виде драйверов типа USB-UART и прочих.

Для работы с АЦП и цифровыми генераторами используется передача данных по SPI с функцией прямого доступа к памяти (DMA) – обмен данными между устройствами, при котором для обращения к внутренней памяти не задействуется ядро Cortex-M3, что увеличивает скорость передачи.

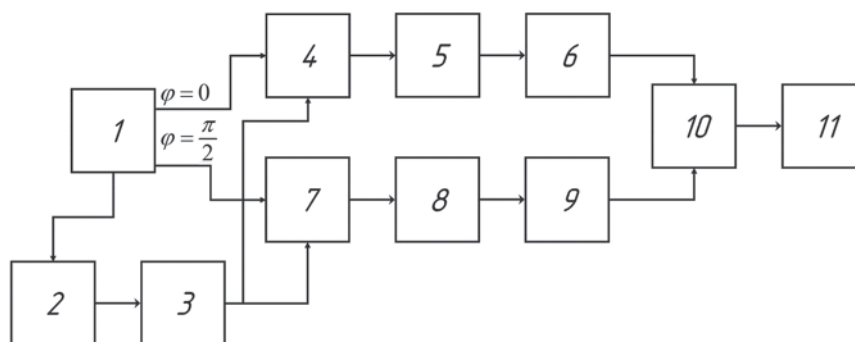


Рис. 1. Структурная схема системы сбора и обработка данных вихретокового контроля:

- 1 – квадратурный синтезатор частоты; 2 – вихретоковый датчик; 3 – программируемый усилитель;  
 4, 7 – аналоговые умножители; 5, 8 – фильтры нижних частот четвертого порядка;  
 6, 9 – аналогово-цифровой преобразователь (АЦП); 10 – микроконтроллер; 11 – персональный компьютер (ПК)

Генерация сигнала задается с помощью генераторов прямого цифрового сигнала (DDS), проходит усиление и фильтрацию. Выбор DDS-генераторов обусловлен необходимостью реализации многочастотного метода исследования оболочки твэла, в процессе которого необходимо достаточно быстро и точно проводить перестройку частоты без искажений сигнала и переходных процессов.

В процессе исследования оболочка твэла перемещается относительно преобразователя по запрограммированной сетке координат – по равномерным нанесенным точкам с определенным шагом. Такой процесс сканирования позволяет провести мэппинг ответного сигнала по всей оболочке и собрать четырёхмерный массив данных на разных частотах.

Путём применения алгоритмов обработки данных, схожих с таковым для обработки изображения, применения программных фильтров на выходе удастся получить информативную картину сплошности металла оболочки твэла. Но, несмотря на столь широкий спектр алгоритмов и решений, необходимо доводить сигнал еще на этапе его оцифровки. Фильтров, которые могут быть реализованы в измерительной схеме, будет недостаточно. Поэтому особое внимание уделяется применению DSP ядра микроконтроллера в обработке сигнала после первичной фильтрации.

Применение новых решений привело к существенному ускорению процесса сканирования оболочки твэла, упрощению процесса калибровки измерительной системы, улучшению соотношения сигнал/шум. Опытный образец системы сбора и обработка данных вихретокового контроля подготовлен и ожидает участия в испытаниях на реальных образцах твэл.

Использование нового микроконтроллера позволило существенно снизить количество компонентов на печатной плате и, как следствие, уменьшить габариты устройства, повысить надежность и качественно улучшить характеристики устройства.

Разработка предназначена для замены уже существующей системы сбора данных, которая была апробирована ранее на исследовательской базе АО «ИРМ» (Институт реакторных материалов).

### Список литературы

1. Charles J. Hellier. Handbook of Nondestructive Evaluation. 2011
2. Tian G.Y., Sophian A. Defect classification using a new feature for pulsed eddy current sensors. – NDT and E International. Vol. 38, Issue 1, C. 77–82 (2005). DOI: 10.1016/j.ndteint.2004.06.001.
3. Auld B.A., Moulder J.C. Review of advances in quantitative eddy current nondestructive evaluation. – Journal of Nondestructive Evaluation Vol. 18, Issue 1, C.3-36 (1999). DOI: 10.1023/A:1021898520626.
4. Porollo S.I., Konobeev Yu.V. Garner F.A., Swelling and microstructure of austenitic stainless steel ChS68 CW after high dose neutron irradiation. – Journal of Nuclear Materials 393(1). C.61–66 (2009).
5. F.G. Reshetnikov, Yu.K. Bibilashvili, and I.S. Golovnin. Development, manufacture and operation of the fuel elements from power reactors, vol. 11. Moscow: Energoatomizdat, 199.

## **Интеллектуальные методы обработки данных при многопараметрическом вихретоковом контроле оболочек твэл из аустенитной стали**

**А.И. Максимкин**, Е.Г. Белендрясова, М.В. Тюриков, А.А. Федяков

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ – Москва, Россия

Опыт применения интеллектуальных методов к расшифровке массивов данных многопараметрического вихретокового контроля оболочек твэл подробно изложен в статье. Рассмотрены преимущества данного подхода и сделан анализ возможности дальнейшего применения в области диагностики и неразрушающего контроля изделий из аустенитных сталей, а в данном случае – оболочек твэл атомных реакторов типа БН-600.

## **Intelligent Data Processing Methods for Multi-frequency Eddy Current Control of Austenitic Steel Fuel Rod Claddings**

**A.I. Maximkin**, E.G. Belendryasova, M.V. Tyurikov, A.A. Fedyakov

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute) – Moscow, Russia

The experience of applying intelligent methods to decoding data arrays of multi-frequency eddy current control of fuel rod claddings is described in details in the article. The advantages of this approach are considered and an analysis is made of the possibility of further application in the field of diagnostics and non-destructive testing of austenitic steel products, and in this case, fuel rod claddings of BN-600 nuclear reactors.

Материалы, используемые для изготовления оболочки твэл, должны обладать особыми характеристиками, чтобы выдерживать высокий поток нейтронов, высокое внутреннее давление, высокие температуры, механические колебания и многие другие факторы агрессивной среды. Поэтому оболочки твэл необходимо исследовать всесторонними методами на различных этапах их жизненного цикла. Цель исследований – обнаружить дефекты и определить их параметры, которые могут вызвать разрушение и потерю герметичности твэла в период эксплуатации в составе ТВС. Для этого используются различные методы исследования состояния металлов, но особое место выделяется неразрушающим методам контроля. Особое внимание в настоящее время заслуживает вихретоковый метод. Он позволяет выявить дефект, определить его глубину и расположение внутри материала.

Одна из проблем данного метода – высокая чувствительность, в том числе и к помехам, а также обработка больших данных. С датчика приходит множество сигналов, опираясь на которые нужно определить характеристики дефекта. Столь высокочувствительный метод позволяет определять трещины и несплошности в металлах, изменение их химического и фазового состава, наличие и толщину покрытий, в том числе оксидных плёнок. Широкие возможности применения метода открывают большие перспективы коммерческого применения диагностических систем. С другой стороны, верное обнаружение дефектов, определение их параметров представляет собой непростую задачу обработки больших массивов диагностических данных, выделения полезных сигналов на фоне шумов. Поэтому, помимо аппаратных решений, требуются новые методические и программные решения обработки выходных диагностических данных.



Это вычислительно трудная задача, с которой сложно справиться человеку, особенно если необходимо обработать данные от нескольких дефектов объекта контроля, которые, в свою очередь, могут быть близко расположенными или даже накладываться друг на друга.

Эти едва различимые зависимости между сигналами от малых или близкорасположенных дефектов способны улавливать алгоритмы, построенные на основе нейронных сетей.

В данной работе рассматривается применение искусственной нейронной сети для анализа данных вихретокового дефектоскопа, представленных в виде набора изображений, полученных на разных частотах, а следовательно, разных по глубине проникновения сигнала в глубь металла.

Вихретоковый датчик представляет собой катушку диаметром 3 мм с сердечником, которая перемещается системой позиционирования с целью сканирования объекта контроля. Объект контроля – оболочка трубчатого твэла реактора БН-600 из аустенитной стали марки ЧС-68 диаметром 6,9 мм и толщиной стенки 0,4 мм. На рис. 1 представлена визуализация в среде моделирования наведенного вихретоковым датчиком поля в оболочке твэла.

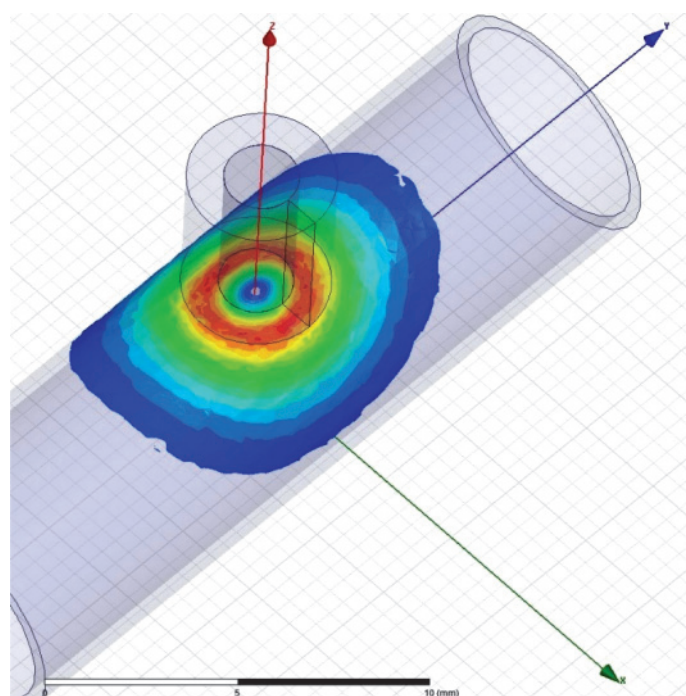


Рис. 1. Визуализация наведенного поля в оболочке твэла

Из рис. 1 видно, что чувствительная область представляет собой кольцо с размерами, соответствующими геометрическим параметрам обмотки катушки.

С целью проверки работоспособности изготовлен образец (рис. 2) с дефектами, с заранее известными параметрами (табл. 1) и их расположением (рис. 3).



Рис. 2. Оболочка с искусственными дефектами

Оболочка имеет три вида искусственных дефектов: продольные трещины и отверстия сквозные и несквозные. На рис. 3 представлена схема расположения дефектов.

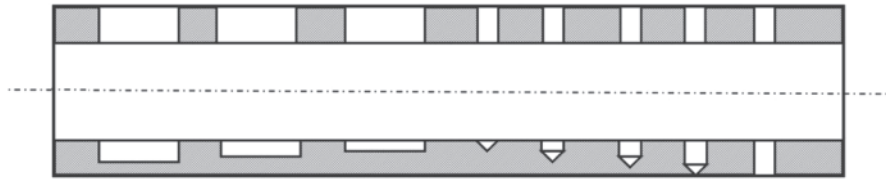


Рис. 3. Схема расположения дефектов

Дефекты, изображенные на рис. 3, обладают параметрами, представленными в табл. 1.

Таблица 1

Параметры дефектов

Вид дефекта	Параметр	Значение
Отверстие сквозное (6 шт.)	диаметр, мм	0,5
Отверстие	диаметр, мм	0,5
	глубина, мм	0,05; 0,1; 0,2; 0,35
Продольная трещина	раскрытие, мм	0,2
	глубина, мм	0,1; 0,2; 0,3; 0,4
Продольная трещина сквозная	раскрытие, мм	0,4
Утонение	глубина, мм	0 – 0,3
	ширина участка, мм	35

В соответствии с методикой исследования образца твэл, выполняется мэппинг оболочки или получение значений изменения наводимой на катушку обратной ЭДС в зависимости от координат в цилиндрической системе.

В результате мэппинга создается массив данных. Изменение обратной ЭДС фиксируется аппаратурой в виде двух компонент полного сопротивления:  $X_R$  – реальное значение сопротивления в цепи,  $X_L$  – мнимое – с привязкой к координате относительно поверхности оболочки твэл и частоты наводимого поля. Развёртка этих данных на одной из частот и выделение необходимой реальной компоненты даёт нам растровое изображение, которое пригодно для дальнейшей обработки и расшифровки (рис. 4).

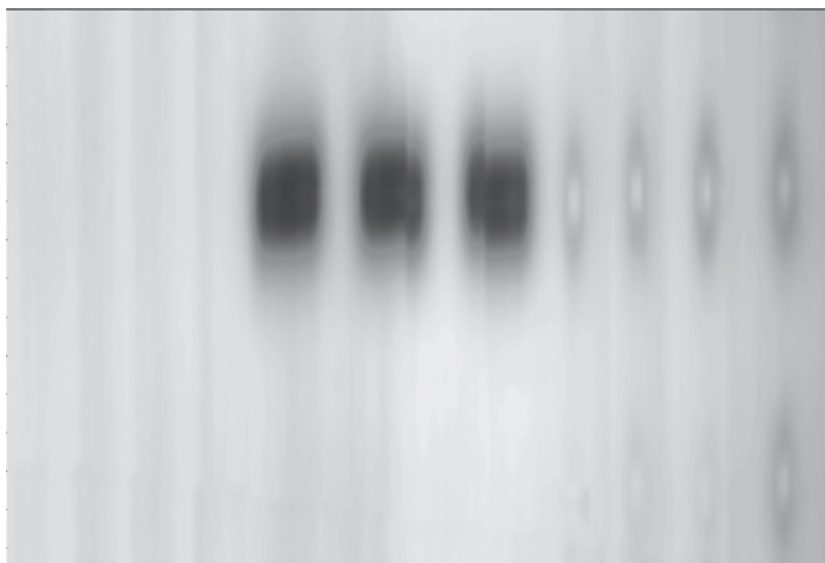


Рис. 4. Результат сканирования оболочки

После визуализации данные представляют собой одноканальное (в градациях серого) изображение (рис. 4), на котором отчетливо видны дефекты, заложенные в тестовый образец. Особенно стоит обратить внимание, что метод позволяет определять дефекты на внутренней поверхности оболочки. На рисунке также отчетливо видна структура металла оболочки, связанная с особенностью технологии изготовления твэл.

В процессе визуализации применяется алгоритм автоподстройки контрастности изображения путём поворота фазовой плоскости. Массивы данных обрабатываются в программной оболочке, разработанной в среде графического программирования NI LabVIEW, выполняющей функции интерфейса пользователя и связи с другими программными пакетами и компонентами. Для преобразования использовалось только реальное значение сопротивления. Вращение фазы сигнала выполняется математически.

Всего было получено 50 изображений, из которых 34 имели различные дефекты и использовались для дальнейшей разметки.

Для анализа опыта применения искусственных нейронных сетей для обработки данных вихретокового дефектоскопа использовались статьи [1], [2], [3]. В [1] для анализа данных датчика применялась простейшая многослойная нейронная сеть (ANN), а в [2] описывалось применение глубокой полносвязной нейронной сети (DNN). В [3] рассматривалось применение сверточной архитектуры нейронной сети (CNN). В работе с помощью обученного алгоритма CNN был оценен неизвестный параметр – глубина трещины.

В статье [4] очень подробно описаны методы усовершенствования CNN с целью увеличения точности классификации дефектов. Авторы добились очень высокой точности классификации дефектов при помощи CNN.

Для анализа и сравнения алгоритмов R-CNN, Fast R-CNN, Faster R-CNN использовалась научная статья [5], где проводилось сравнение ResNet50 и VGG16, на основании которого был сделан выбор, какую именно из архитектур CNN следует применить к данной задаче.

В результате работы реализованы алгоритмы обнаружения и классификации объектов на основе Faster R-CNN с архитектурой ResNet50 свёрточной нейронной сети. Удалось достичь достаточно хороших показателей, в том числе высоких вероятностей обнаружения дефектов. В настоящий момент исследовательская работа по данной тематике продолжается. В ближайшее время предполагается начать испытание программного комплекса на реальном экспериментальном оборудовании, разработанном на кафедре конструирования приборов и установок (№18) НИЯУ МИФИ, на исследовательской базе АО «ИРМ» (Институт реакторных материалов).

### Список литературы

1. Harzallah, S., Rebhi, R., Chabaat, M., Rabehi, A. Eddy current modelling using multi-layer perceptron neural networks for detecting surface cracks. – *Frattura ed Integrità Strutturale*. – 2018. – 12(45). – С. 147–155.
2. J. Park, S.-J. Han, N. Munir, Y.-T. Yeom, S.-J. Song, H.-J. Kim, S.-G. Kwon, Mrpc eddy current flaw classification in tubes using deep neural networks. – *Nuclear Engineering and Technology*. – 2019. – 51(7). – С. 1784 – 1790. doi: 10.1016/j.net.2019.05.011.
3. K. Demachi, T. Hori, and S. Perrin. Crack depth estimation of non-magnetic material by convolutional neural network analysis of eddy current testing signal. – *Journal of Nuclear Science and Technology*. – 2020. – Вып. 57(4). – С. 401–407.
4. Zhu, P.; Cheng, Y.; Banerjee, P.; Tamburrino, A.; Deng, Y. A novel machine-learning model for eddy current testing with uncertainty. – *Ndt Int.* – 2019. – 101. – С. 104–112.
5. А.А. Сирота, Е.Ю. Митрофанова, А.И. Милованова / Вестник ВГУ, серия: системный анализ и информационные технологии. – 2019. – №3. – С. 123–137.

## Программное обеспечение для валидации характеристик систем управления

И.Ю. Лепехин, П.А. Голубев, **А.Н. Малышев**

Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седатова» - Нижний Новгород, Россия

Программное обеспечение для валидации характеристик систем управления (СУ) позволяет проводить измерение времени передачи управляющих воздействий от автоматизированных рабочих мест (АРМ) из состава систем верхнего уровня (СВУ) до низовых подсистем и времени передачи технологических параметров от низовых подсистем до АРМ из состава СВУ в автоматизированном режиме. Вышеуказанное программное обеспечение собирает статистику измеряемых величин, осуществляет поиск экстремумов и среднего значения.

## Software for Validation of Control System Characteristics

I.Yu. Lepehin, P.A. Golubev, **A.N. Malyshev**

Branch of RFNC-VNIIEF "NIIS named after Yu.Ye. Sedakov" - Nizhny Novgorod, Russia

The software for validating the characteristics of control systems (CS) measures the time of transmission of control actions from automated workstations (AWS) from the upper-level systems (ULS) to subsystems connected to sensors and actuators, and the time of transmission of values of technological parameters from these systems to the AWS from the ULS in automated mode. The software also collects statistics of the measured transmission times and searches for extremes and averages.

### Введение

Современные автоматизированные СУ для промышленных объектов реализуются в большинстве случаев в виде распределенной по функциям и средствам вычислительной среды с компонентами, представляющими собой совокупность аппаратных и программных средств, которые обеспечивают сбор, накопление, асинхронную обработку, представление и передачу информации. Компоненты СУ могут быть распределены как пространственно, так и функционально [1–4].

### Структура типовой системы управления технологическими процессами

В работе будет рассматриваться типовая СУ [5] для индустриального объекта.

Исследуемая типовая структура СУ представлена на рис. 1 и имеет три уровня:

- низовые контролеры и шлюзы – уровень НУ;
- серверы первичной обработки и хранения данных – уровень С;
- компоненты, обеспечивающие человеко-машинный интерфейс – уровень ЧМИ.

К серверу (уровень С) могут быть подключены один и более компонентов уровней ЧМИ и НУ.

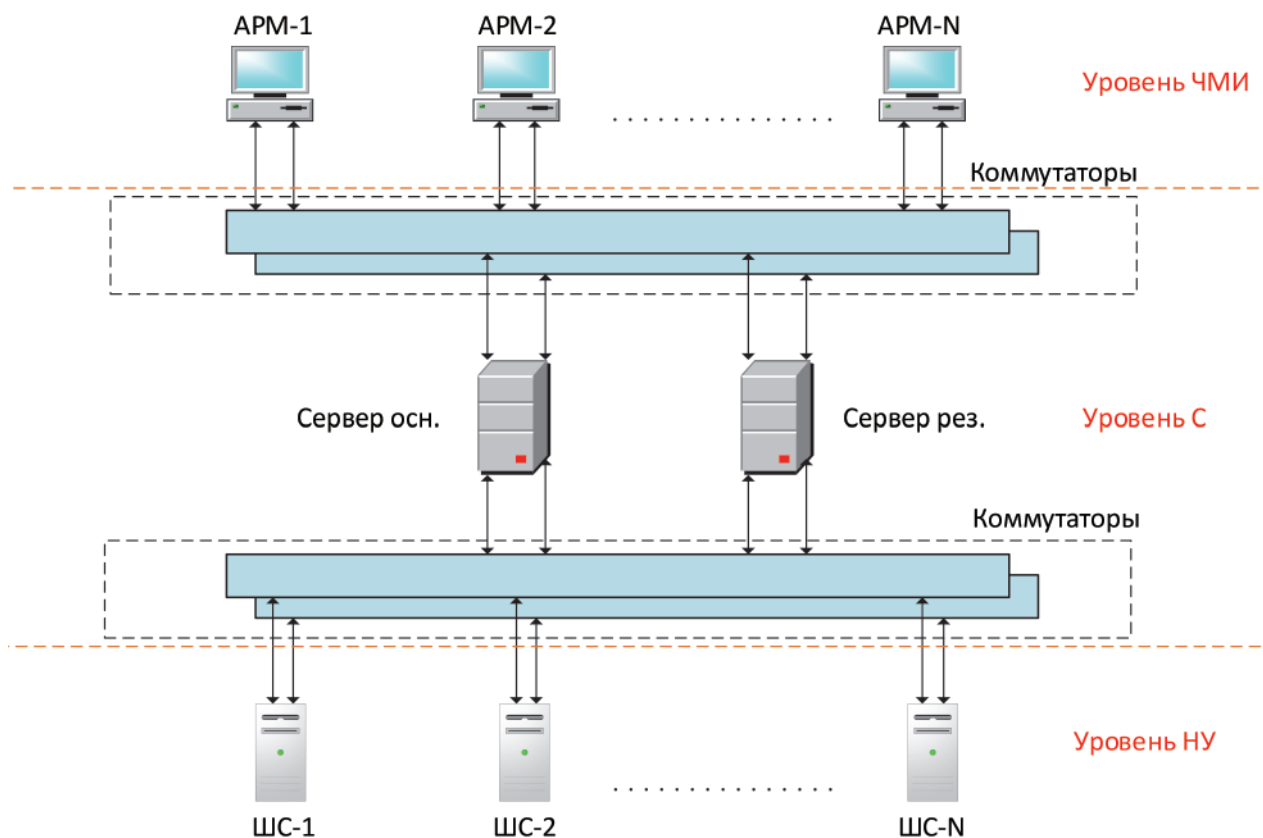


Рис. 1. Типовая схема исследуемой системы управления

### Структура программного обеспечения

Для тестирования временных характеристик было разработано программное обеспечение, измеряющее время передачи сигналов от уровня НУ до их отображения на уровне ЧМИ, а также время передачи команд управления и значений уставок (при их задании) от уровня ЧМИ до уровня НУ. Каждый передаваемый сигнал имеет свой идентификатор и атрибуты (значение (V), метку времени (T) и метку достоверности (Q)).

Программное обеспечение реализовано как набор компонент и состоит из:

- компоненты, обеспечивающей конфигурацию имитаторов уровня НУ, задающей поток и имитации отдельно взятых сигналов. Также на данном уровне осуществляется присвоение меток времени сымитированным сигналам и меток времени поступления на уровень НУ команд, поданных с уровня ЧМИ;
- компоненты, обеспечивающей измерение времени отображения информации на уровне ЧМИ, а также времени подачи команды с уровня;
- компоненты управления, устанавливающейся на сервисном компьютере и обеспечивающей запуск компонента, установленного на уровне ЧМИ, подготовку конфигураций уровня НУ, поиск сигналов в архиве уровня С и получение их меток времени.

Получив конфигурацию от компонента управления, уровень НУ имитирует непрерывный поток сигналов, также с определённой периодичностью обеспечивается имитация отдельно взятого сигнала (обозначен меткой Sig на рис.2), на примере которого и проводится измерение времени прохождения информации. После передачи конфигурации на уровень НУ основной задачей компонента управления является получение метки времени имитации сигнала, для чего вышеуказанный компонент непрерывно осуществляет поиск в архиве уровня ЧМИ сигнала (Sig). Параллельно с вышеуказанными процессами, компонентом,



установленным на уровне ЧМИ, проводится непрерывное сканирование дисплея РС и обеспечивается измерение метки времени  $T(\text{ЧМИ})$  отображению сигнала ( $\text{Sig}$ ). После получения компонентом управления  $T(\text{ЧМИ})$  происходит вычисление времени прохождения  $\text{Sig}$  от уровня НУ до уровня ЧМИ по формуле:

$$T(C) = T(\text{ЧМИ}) - T(\text{НУ}), \tag{1}$$

где  $T(C)$  – время прохождения сигнала от уровня НУ до отображения на уровне ЧМИ;  $T(\text{ЧМИ})$  – метка времени отображения сигнала на уровне ЧМИ;  $T(\text{НУ})$  – метка времени имитации сигнала.

Схема функционирования тестового программного обеспечения в части измерения времени прохождения сигнала от уровня НУ до уровня ЧМИ приведена на рис. 2.

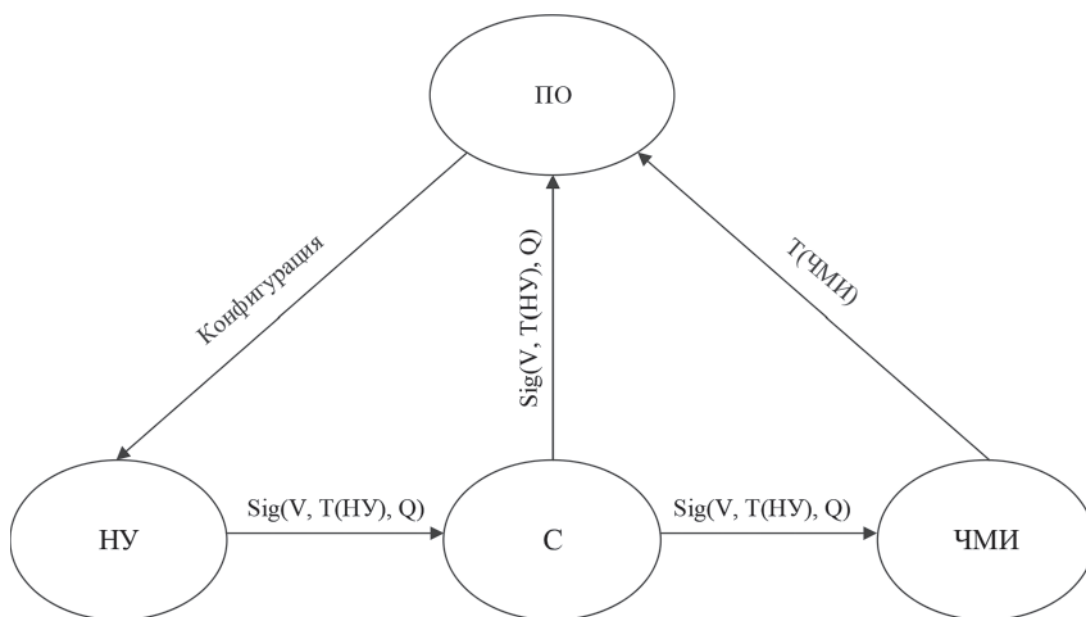


Рис. 2. Схема функционирования программного обеспечения в части измерения времени прохождения сигнала от уровня НУ до уровня ЧМИ

При определении времени передачи управляющего воздействия от уровня ЧМИ до уровня НУ компонентом, установленном на уровне ЧМИ, производится фиксация времени  $T(\text{ЧМИ})$  нажатия кнопки мыши (с помощью которого подаётся команда), после получения команды уровнем НУ производится автоматическая генерация сигнала, имитирующая отклик реальной системы, подтверждающего получение команды управления, данный сигнал ( $S_{com}$ ) передаётся на уровень С, где архивируется. При этом компонент управления непрерывно осуществляет поиск в архиве уровня С сигнала  $S_{com}$ , после получения из архива метки времени  $T(\text{НУ})$  происходит вычисление времени прохождения команды управления от уровня ЧМИ до уровня НУ по формуле:

$$T(C) = T(\text{НУ}) - T(\text{ЧМИ}), \tag{2}$$

где  $T(C)$  – время прохождения команды управления от уровня ЧМИ до уровня НУ,  $T(\text{НУ})$  – метка времени получения команды управления на уровне НУ,  $T(\text{ЧМИ})$  – метка времени подачи команды управления на уровне ЧМИ (клика мыши).

Схема функционирования программного обеспечения в части измерения времени прохождения команды управления от уровня ЧМИ до уровня НУ приведена на рис. 3.

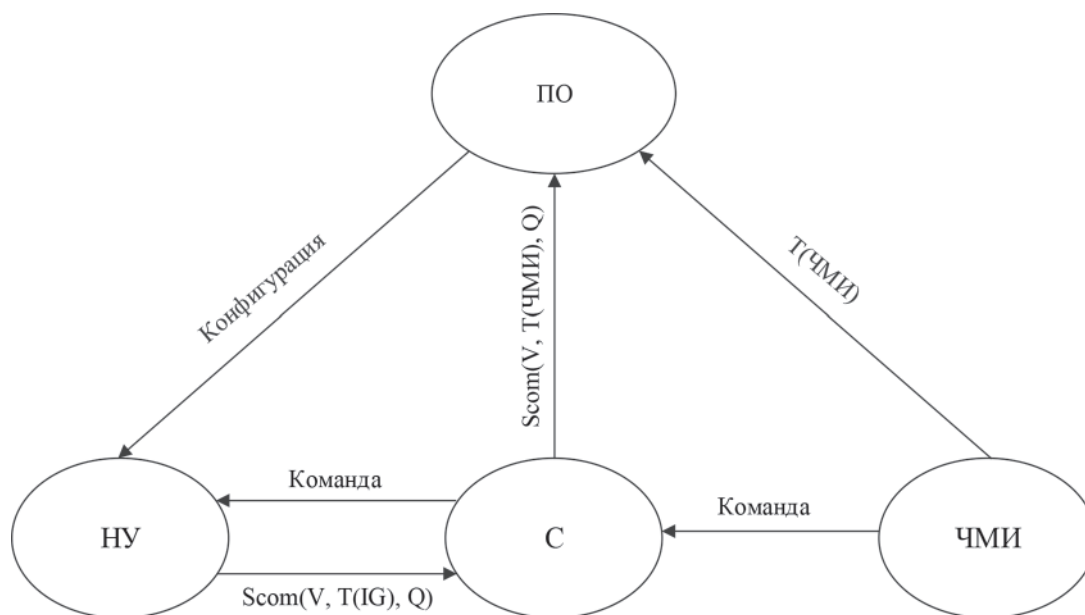


Рис. 3. Схема функционирования программного обеспечения в части измерения времени прохождения управляющего сигнала от уровня ЧМИ до уровня НУ

### Заключение

Для проведения автоматизированной валидации временных характеристик СУ было разработано программное обеспечение, которое выступает как внешний агент по отношению к проверяемой системе.

Программное обеспечение для валидации характеристик СУ обеспечивает валидацию часто задаваемых требований:

- времени обработки в отдельных компонентах СУ при различных потоках данных;
- времени передачи информации между компонентами СУ при различных потоках данных;
- соответствия рабочей базе данных СУ исходным данным.

Были проведены работы по верификации и валидации разработанного программного обеспечения, с помощью средств видеофиксации были подтверждены корректности величин, получаемых с его помощью.

Программное обеспечение собирает в автоматизированном режиме статистику измеряемых величин, осуществляет поиск минимального, максимального и среднего значения, а выполнение данных операций позволяет многократно сократить сроки проведения испытаний и трудозатраты на их проведение, также стоит отметить, что при масштабировании системы (увеличения количества входящих в нее узлов и, соответственно, увеличения объема проверок) экономический эффект от применения вышеуказанного программного обеспечения также возрастает.

### Список литературы

1. Raj Jain. Art of Computer Systems Performance Analysis Techniques For Experimental Design Measurements Simulation And Modeling. Wiley Computer Publishing, John Wiley & Sons, Inc. ISBN: 0471503363 1991.
2. IAEA TECDOC No. 1830 On-line Monitoring of Instrumentation in Research Reactors 978-92-0-108517-7 2017.
3. Topor-Kaminski T., Żurkowski, R. Grygiel, M. (2011). Selected Methods of Measuring the Delay in Data Transmission Systems with Wireless Network Interfaces. Acta Physica Polonica A. 120. 10.12693/APhysPolA.120.748.
4. ГОСТ 28195-89 Оценка качества программных средств. Общие положения. 1989.
5. Бывайков М.Е., Жарко Е.Ф., Менгазетдинов Н.Э., Полетыкин А.Г., Прангишвили И.В., Промыслов В.Г. Опыт проектирования и внедрения системы верхнего блочного уровня АСУ ТП АЭС // Автоматика и телемеханика. – 2006.

## Проектирование системы сбора и обработки данных нейтронной диагностики ДМНП

В.А. Федоров<sup>1</sup>, Н.А. Селяев<sup>1</sup>, **Е.С. Мартазов**<sup>1</sup>, Ю.А. Парышкин<sup>1</sup>,  
к.ф.-м.н. Ю.А. Кашук<sup>2</sup>, В.А. Воробьев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ – Москва, Россия;

<sup>2</sup> Частное учреждение Госкорпорации «Росатом» «Проектный центр ИТЭР» – Москва, Россия

Представлены результаты проектирования системы сбора и обработки данных (ССД) для нейтронной диагностики «Диверторный монитор нейтронного потока» (ДМНП) международного проекта ИТЭР. Рассматривается архитектура системы сбора данных и ее компонентов, приводятся технические характеристики и результаты испытаний прототипа системы на ядерных установках.

## Design of the Neutron Diagnostic DNFM Data Acquisition System

V.A. Fedorov<sup>1</sup>, N.A. Selyaev<sup>1</sup>, **E.S. Martazov**<sup>1</sup>, Yu.A. Paryshkin<sup>1</sup>,  
PhD Yu. A. Kashchuk<sup>2</sup>, V. A. Vorobev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute) – Moscow, Russia;

<sup>2</sup> Institution "Project Center ITER" – Moscow, Russia

This report shows the results of the data acquisition and processing system design for neutron diagnostics “Divertor Neutron Flux Monitor” of the international ITER project. The architecture of the data acquisition system and its components is discussed. The technical characteristics and test results of the prototype system on nuclear facilities are given.

Диагностика ДМНП – одна из основных нейтронных диагностик установки ИТЭР. Согласно проектным требованиям, она должна обеспечивать измерение полного нейтронного выхода и термоядерной мощности с временным разрешением 1 мс и погрешностью измерения не более 10% в широком динамическом диапазоне. Диагностика состоит из трех подсистем, каждая из которых включает в себя детекторный модуль и систему сбора, обработки и регистрации данных. Детекторные модули будут располагаться на внутренней части вакуумной камеры ИТЭР под кассетами дивертора через 1200. Для регистрации плотности потока нейтронов используется мультidetекторный модуль, состоящий из шести ионизационных камер деления (ИКД) с различной чувствительностью к нейтронам, а также ССД, обрабатывающая сигналы каждой ИКД. К проектированию системы сбора и обработки данных ДМНП предъявлялись следующие основные требования: унификация сетевых интерфейсов и оборудования на основе платформы PXIe фирмы National Instruments (NI) и контроллеров Siemens; использование для документирования проекта программных пакетов SEE Electrical Expert и Enterprise Architect; ограничение на применение программируемых компонентов в узлах системы, размещаемых в зоне воздействия ионизирующих излучений; следование международным стандартам и обеспечение качества на всех этапах разработки, изготовления и испытаний.

В процессе проектирования ССД выполнены моделирование и исследование различных способов обработки сигналов ионизационных камер деления (ИКД). Предложено построить канал обработки сигнала одной ИКД на основе четырех измерительных трактов – импульсном, флуктуационном, импульсно-флуктуационном и токовом, которые обеспечивают кон-

троль плотности потока нейтронов в различных режимах работы установки. Особенностью импульсно-флуктуационного тракта является использование в качестве информативного сигнала интеграла линейно детектированных флуктуаций сигнала ИКД [1]. Разработана структура системы, отработаны схемотехнические решения усилителей сигналов измерительных трактов, разработано программное обеспечение для реализации измерительных и диагностических процедур системы в устройствах цифровой обработки сигналов, а также передачи данных в информационную сеть ИТЭР.

На рис. 1 представлена упрощенная блок-схема подсистемы диагностики ДМНП. Модуль детектирования ДМНП включает в себя два узла детектирования, один из которых содержит три ИКД с радиатором  $^{235}\text{U}$ , второй – три ИКД с радиатором  $^{238}\text{U}$ . Чувствительность камер в одном детекторном узле имеет отношение 1:10:100. Использование подобного детекторного модуля позволяет обеспечить требуемый динамический диапазон с заданной погрешностью измерений.



Рис. 1. Блок-схема системы

ССД имеет пространственно-распределенную структуру. Блок предварительных усилителей (БПУ) состоит из шести модулей предварительного усилителя (МПУ), установленных в кейте 6U, и будет размещаться в экранированном защитном боксе в ячейке нижнего порта на расстоянии около 15 м от детекторного модуля. Блок обработки сигналов (БОС) включает: шесть блоков контроля и предварительной обработки (БКПО), шесть выносных модулей устройства передачи данных (УПД), блок питания с фильтрами и защитой. БОС будет располагаться в галерее здания токамака. БОС выполняет предварительную аналоговую обработку сигналов МПУ, преобразование нормированных сигналов в цифровой код и передачу его в PXIe-систему. Для преобразования в код используются АЦП (разрешение 14 бит, частота дискретизации 120 МГц), установленные в выносных модулях УПД. Параллельный цифровой код АЦП преобразуется в последовательный и передается по волоконно-оптической линии связи в основной модуль УПД с помощью оптических приемо-передатчиков.

PXIe-система принимает данные, проводит их быструю цифровую обработку в программе модуля FPGA FlexRIO фирмы NI, и далее пакеты данных поступают в рабочую станцию (PC), выполненную на основе промышленного компьютера. Программное обеспечение PC обрабатывает данные с тактом 1 мс, вычисляет приведенную скорость счета по сигналам всех измерительных трактов и публикует их в сетях системы управления CODAC. Промышленный компьютер и PXIe-система вместе с дополнительным оборудованием располагаются в стойке, которая находится в отдельном здании диагностик.

Масштаб проекта ИТЭР приводит к необходимости строгого взаимодействия всех участников проекта. Для обеспечения такого взаимодействия все работы по системному и функциональному проектированию ИТЭР и всех входящих в него подсистем выполняются при помощи модельного описания в среде Enterprise Architect (Sparx systems), как это показано на рис. 2.

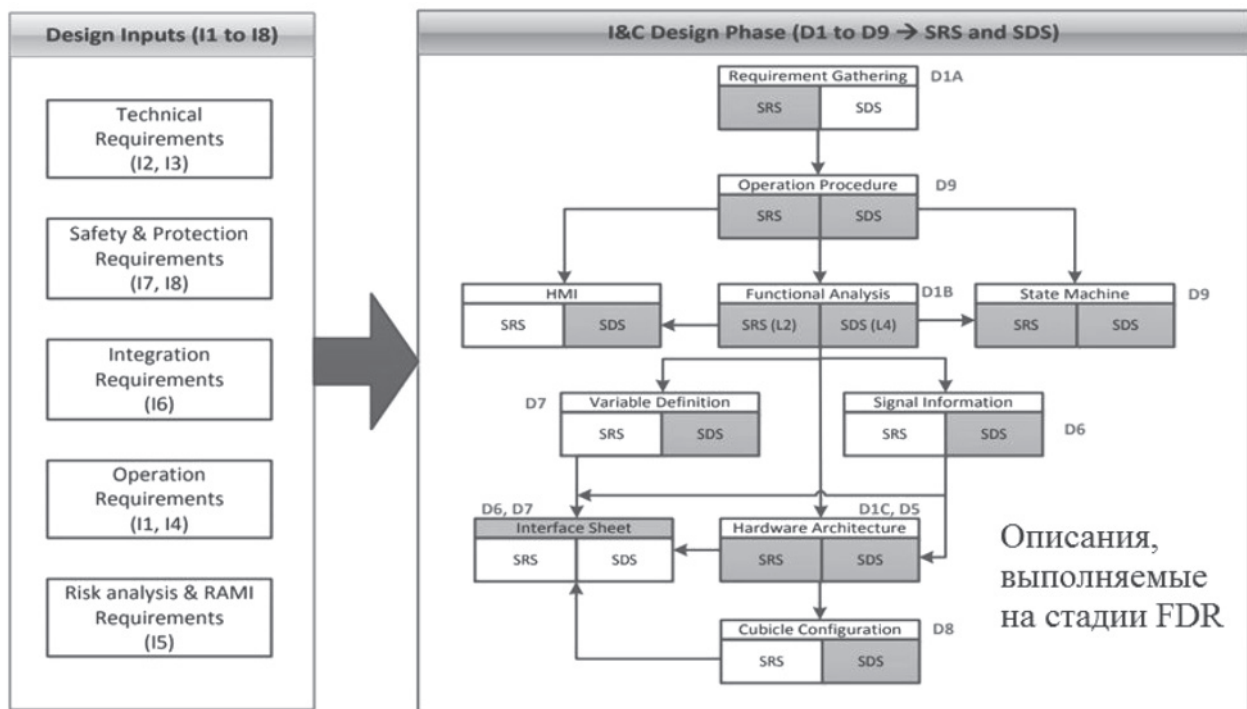


Рис. 2. Описания проекта, выполняемые при помощи Enterprise Architect

Применение Enterprise Architect (EA) как единого инструмента позволяет использовать единые методы и специальные средства, упрощающие процесс проектирования, выполнять верификацию и валидацию результатов проектирования на уровне моделей, автоматизированное создание документации для разных стадий жизненного цикла.

Описание ДМНП в проекте EA включает: цель создания и сценарии использования системы; описание требований с указанием документов, регламентирующих требования, работа системы в окружении ИТЭР (автомат состояний; последовательность процедур, описанная вплоть до отдельных действий пользователей или функций, выполняемых системой; описание функций системы с взаимосвязью через сигналы или переменные и привязкой их к процедурам и требованиям, которые они позволяют реализовать; описание аппаратной (до описаний сигналов и компонентов до уровней модулей) и программной архитектуры системы, а также описание реализации аппаратной архитектуры в виде конфигураций стоек, входящих в состав системы (включая спецификации компонент и тепловые расчеты). После завершения описаний из проекта выгружаются основные текстовые документы проекта: System Requirements Specification (SRS), описывающий требования и концепцию разработки, и System Design Specification (SDS), дающий детальное описание реализации разработки.

Программное обеспечение (ПО) системы включает ПО модулей FPGA FlexRIO, разработанное в среде LabVIEW, и ПО рабочей станции, которое построено на свободно распространяемых программных пакетах и средствах. Ядром системы является сетевая система доступа к данным EPICS, построенная на архитектуре Publisher/Subscriber (используется на крупных научных установках - ускорителях, обсерваториях, реакторах). Для программного обмена данными между FlexRIO и PC используются библиотека niflexrio-lib и модуль ядра kmod-flexrio. На PC с помощью вспомогательной библиотеки NDS принятые данные публикуются в EPICS. Подключенные к EPICS клиенты получают эти данные и обрабатывают (отображают на экран, записывают в архив, устанавливают сигнализации и т.д.).

Основные функции программного обеспечения: предварительная обработка данных на FPGA; прием потока данных на PC; обработка данных и расчет нейтронного потока; обмен



данными с EPICS; управление питанием камер и тестовым генератором; диагностика и контроль ошибок; самодиагностика с помощью встроенного генератора сигналов; дополнительные средства контроля: цифровой осциллограф, спектрометр.

Программное обеспечение PC разработано и проверено для операционной системы Linux Red Hat версии 7.4. Основные используемые при разработке средства: SDD editor, Control System Studio (CSS), Eclipse.

Для проверки технических решений разработана рабочая конструкторская документация, изготовлен и протестирован прототип системы сбора и обработки данных модуля ДМНП [2]. Совместно с модулем детектирования прототип системы испытан на нейтронном стенде АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», построенном на базе нейтронного генератора НГ-24М, и на импульсном реакторе ИБР-2 в ОИЯИ при воздействии на ИКД интенсивного нейтронного и гамма-излучений. В процессе испытаний средствами ССД регистрировались формы импульсов и спектры распределения импульсов по амплитудам и зарядам всех ИКД модуля детектирования. По полученным данным с применением имитатора сигналов камеры [3] производилась калибровка измерительных трактов и определялись параметры настройки, обеспечивающие сопряжение характеристик трактов в областях их перекрытия, и формировались конфигурационные файлы для всех каналов контроля. Далее выполнялась регистрация сигналов ССД в различных режимах работы ядерных установок: пуск, вывод на мощность, плавные и ступенчатые изменения мощности, останов. По данным измерений определялись относительные коэффициенты чувствительности ИКД, линейность измерительных трактов, статистические погрешности. Результаты испытаний подтвердили обоснованность технических решений, реализованных в системе.

Таким образом, в процессе проектирования системы сбора данных диагностики ДМНП:

- разработаны процедуры измерений, обработки и передачи данных;
- выполнено математическое моделирование и макетирование основных узлов и устройств систем сбора данных;
- разработано программное обеспечение для модулей FPGA и рабочей станции;
- разработана конструкторская и программная документация;
- в программной среде Enterprise Architect подготовлен проект системы и необходимый пакет документов для финальной защиты проекта в международной организации ИТЭР;
- изготовлен прототип ССД модуля детектирования ДМНП;
- разработаны программы-методики и проведены испытания прототипа как в лабораторных условиях с применением разработанного испытательного стенда, так и эксперименты на реакторных установках с последующей обработкой и анализом больших массивов экспериментальных данных.

Работа выполнена при финансовой поддержке Частного учреждения «Проектный центр ИТЭР» в рамках договора № 17706413348210001850/25-21/01 от 01.06.2021 г.

### Список литературы

1. V.P.Alferov, et al. “Applicaton of Modern Tools for NPP Neutron Monitoring Systems Upgrading”, in Proc. International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Controls, and Human-Machine Interface Technologies (NPIC&HMIT 2000), 2000, pp. 393–401.
2. V.A. Fedorov, et al. “Study of the Data Acquisition System for ITER Divertor Neutron Flux Monitor Diagnostic”, IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 67, No. 4, pp. 688–693, April 2020.
3. I.V. Alyaev, et al. “Wide-range fission chambers signal simulator”, in Proc. 10th International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control, and Human-Machine Interface Technologies (NPIC&HMIT 2017), 2017, vol. 3, pp. 1991–1998.

## Информационно-измерительная система контроля толщины внутреннего слоя биметаллических циркониевых труб

А.Н. Аблеев, **С.П. Мартыненко**, С.С. Мартыненко, Ю.О. Жуковский

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ – Москва, Россия

Система предназначена для вихретокового контроля толщины внутреннего слоя биметаллических циркониевых труб производства АО «Чепецкий механический завод» (г. Глазов), которые в дальнейшем используются для изготовления перспективных двухслойных оболочек твэлов западного дизайна. Система позволяет проводить автоматическое сканирование внутренней поверхности труб по длине до 4,5 м и измерять толщину внутреннего слоя во всех сечениях согласно требованиям заказчика. В настоящее время проходит метрологическую аттестацию и внедряется в качестве штатного средства контроля на АО «ЧМЗ».

## Information and Measuring System for Monitoring the Thickness of the Inner Layer of Bimetallic Zirconium Pipes

A.N. Ableev, **S.P. Martynenko**, S.S. Martynenko, Yu.O. Zhukovsky

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute) – Moscow, Russia

The system is designed for eddy current control of the thickness of the inner layer of bimetallic zirconium pipes manufactured by JSC “Chepetsky Mechanical Plant” in Glazov (Udmurt Republic, Russia), which are later used for the manufacture of promising double-layer claddings of fuel rods of Western design. The system allows automatic scanning of the inner surface of pipes up to 4.5 m in length and measuring the thickness of the zirconium layer in all sections according to customer requirements. Currently, it is undergoing metrological certification and is being implemented as regular instruments of control at CMP JSC.

В НИЯУ МИФИ на кафедре «Конструирование приборов и установок» разработаны вихретоковый метод, методика и информационно-измерительная система, предназначенные для контроля толщины внутреннего слоя биметаллических циркониевых труб в условиях производства АО «ЧМЗ».

Основные характеристики труб:

- наружный диаметр:  $63,5 \pm 1,28$  мм;
- внутренний диаметр:  $41,65 \pm 0,26$  мм;
- длина труб: от 1,0 до 4,5 м;
- толщина внутреннего слоя:  $2,08 \pm 0,30$  мм;
- материал наружного слоя: циркалой-2;
- материал внутреннего слоя: цирконий с добавкой железа 0,125%.

Известно, что плотность вихревых токов в объекте контроля зависит от геометрических параметров (толщина внутреннего и наружного слоёв), электропроводности слоёв, их магнитной проницаемости, частоты возбуждения и температуры. Поскольку электрофизические характе-

ристики наружного и внутреннего циркониевых слоёв отличаются незначительно, то для достижения необходимых точностных показателей в системе использован комплекс мер, направленных на уменьшение как случайной, так и систематической составляющей погрешности. К таким мерам относятся, прежде всего, стабилизация зазора между вихретоковой катушкой и поверхностью трубы при сканировании, трёхчастотный дифференциальный метод измерения, автокалибровка системы на настроенном образце, использование элементной базы со стабильными характеристиками, специализированное программное обеспечение и ряд других приёмов, позволивших в итоге проводить контроль толщины внутреннего слоя с точностью не хуже 0,05 мм. Для контроля готовых двухслойных циркониевых оболочек вихретоковый метод использован в [1].

На рис. 1 показана структурная схема системы. Она состоит из следующих основных частей: модуля перемещения 9 со вспомогательным оборудованием (пп. 1–11, рис.1), вихретокового датчика 12, стандартного образца с известной толщиной внутреннего слоя 14, системы подачи и фиксации контролируемых труб 15 (пп. 16–18), шкафа 22 с блоком управления 20 и промышленным компьютером 21, а также программ сбора и обработки информации.

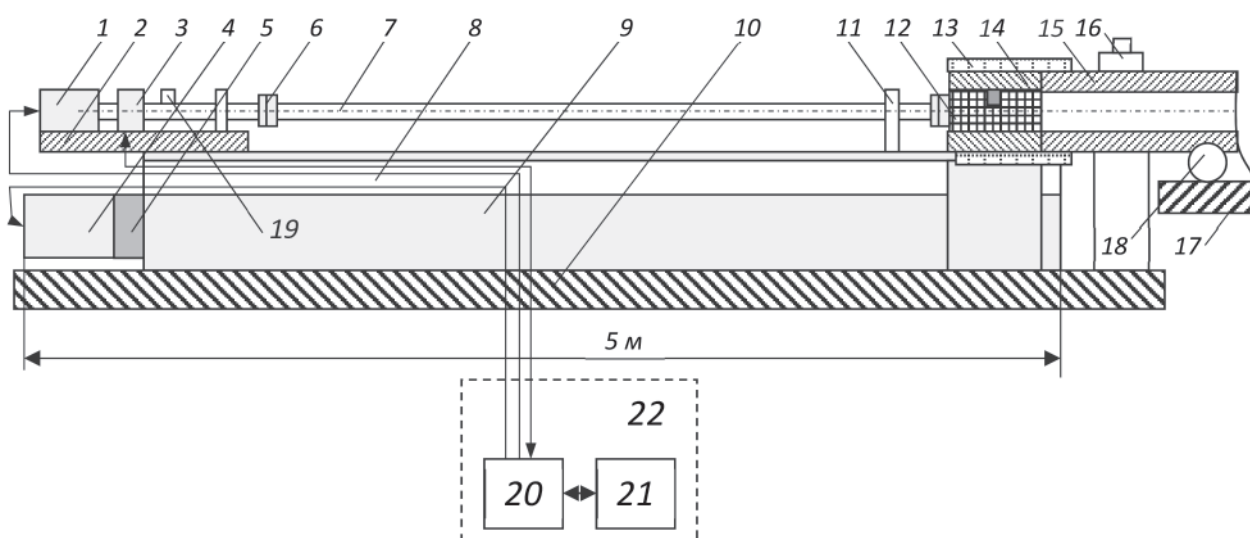


Рис. 1. Структурная схема системы контроля толщины внутреннего слоя биметаллических циркониевых труб:

- 1 – шаговый двигатель; 2 – подвижная каретка; 3 – токосъемник; 4 – сервопривод; 5 – редуктор;
- 6 – разъем электрический; 7 – штанга углепластиковая; 8 – кабелеукладчик; 9 – модуль перемещения;
- 10 – стол; 11 – стойка; 12 – вихретоковый датчик; 13 – держатель стандартного образца;
- 14 – стандартный образец; 15 – контролируемая труба; 16 – фиксатор трубы; 17 – стол-накопитель труб;
- 18 – ролики перемещения труб; 19 – датчик углового положения; 20 – блок управления;
- 21 – промышленный компьютер; 22 – шкаф

Система обеспечивает автоматическое сканирование вихретоковым датчиком внутренней поверхности труб с установленным шагом контроля по длине, сканирование вихретоковой катушкой датчика каждого сечения трубы с установленным шагом контроля по сечению, контроль толщины внутреннего слоя, калибровку системы с помощью стандартного образца, а также протоколирование всех данных и их представление в удобном для пользователя виде.

Важнейшим элементом системы является бесконтактный вихретоковый датчик, который предназначен для сканирования внутренней поверхности труб, возбуждения вихревых токов, регистрации ЭДС, наведённой вихревыми токами, и первичной обработки полученной информации.

На рис. 2 показана 3-D модель датчика. Он состоит из разъема 1, с помощью которого датчик крепится к штанге, двух подшипников 2 с внешними втулками 6 и обрезиненными роликами 3, а также вихретоковой катушки 4 и платы первичной обработки, расположенных в корпусе 5. Ролики 3 обеспечивают продольное перемещение датчика внутри трубы, а подшипники 2 – вращение корпуса 5 и вихретоковой катушки 4 относительно роликов и трубы.

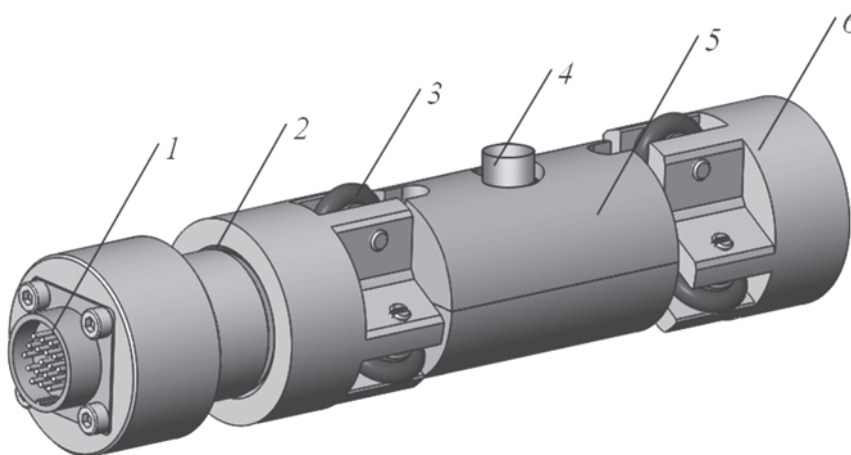


Рис. 2. 3-D модель вихретокового датчика:

1 – разъём; 2 – подшипник (2 шт.); 3 – ролик (6 шт.); 4 – вихретоковая катушка; 5 – корпус; 6 – втулка (2 шт.)

На рис. 3 показана фотография датчика. При сборке датчик присоединяется к электрическому разъёму на углеродистой штанге через ответный разъём 1 (рис. 2) и крепится на штанге с помощью конуса-переходника 4 винтами 5 (рис. 3).

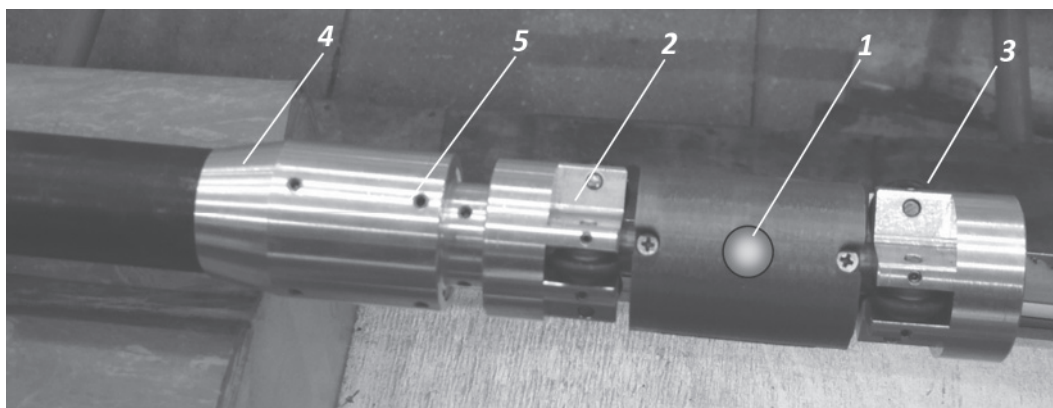


Рис. 3. Фотография вихретокового датчика:

1 – вихретоковая катушка; 2 – поворотная втулка (2 шт.); 3 – ролик (6 шт.); 4 – конус-переходник; 5 – винты крепежные

Программное обеспечение имеет четыре режима работы: «Автоматический контроль», «Просмотр результатов», «Ручное управление», «Настройка параметров».

В качестве примера на рис. 4 показан пользовательский интерфейс в режиме «Автоматический контроль».

При нажатии на кнопку «КОНТРОЛЬ» происходит запуск процесса автоматического контроля трубы по следующему алгоритму:

- 1) перемещение вихретокового датчика-преобразователя (ВТП) на исходную позицию по длине;
- 2) поворот вихретоковой катушки на исходную позицию по углу;
- 3) перемещение ВТП внутрь стандартного образца (СО) так, чтобы катушка оказалась в среднем сечении СО;
- 4) сканирование катушкой внутреннего слоя СО в центральном сечении на угол 360 град с шагом 15 град и автоматическая настройка системы (поста);
- 5) перемещение ВТП на начальную координату контроля трубы;
- 6) пошаговое автоматическое сканирование внутренней поверхности трубы в соответствии со значениями, указанными в окне «Шаг контроля по длине, мм» (рис. 5), сечению – «Шаг контроля по сечению, град» и контроль толщины внутреннего слоя по всей длине трубы, указанной в окне «Длина трубы» за исключением концов длиной 30 мм, указанной в окне «Длина неконтролируемых концов»;
- 7) перемещение ВТП в исходную позицию по длине;
- 8) перемещение катушки ВТП в исходную позицию по углу;
- 9) перемещение ВТП внутрь СО так, чтобы катушка ВТП оказалась в среднем сечении СО;
- 10) сканирование катушкой ВТП внутреннего слоя СО в центральном сечении на угол 360 град с шагом 15 град и проверка настройки поста по СО;
- 11) отображение результатов контроля.



Рис. 4. Пользовательский интерфейс при проведении контроля

На рис. 5 показан пример повторяемости измерений максимальной, средней и минимальной толщины внутреннего слоя по длине трубы № 305-18-1-10-2 производства АО «ЧМЗ» от 26.11.2021 г. и повтор от 12.12.2021 г.





Рис. 5. Пример повторяемости измерений максимальной, средней и минимальной толщины внутреннего слоя трубы от 26.11.2021 г. и 12.12.2021 г.

Таким образом, разработанная информационно-измерительная система позволяет проводить непрерывный автоматический контроль толщины внутреннего слоя биметаллических циркониевых труб длиной до 4,5 м согласно требованиям заказчика.

#### Список литературы

1. Хонжи М., Сакамото Т., Моримото И., Хиодо С. Автоматическая система измерения циркониевого покрытия и толщины Циркалоя-2 в циркониевых трубах-оболочках // Цирконий в атомной энергетике: 8-й международный симпозиум. Публикации и стандарты ASTMSTP 1023, Л.Ф.П. Ван Свам и К.М. Юкен, Американское общество по испытанию материалов ASTM, Филадельфия, 1989 г. – С. 392–402.

## **Информационно-измерительная система контроля формоизменения ТВС реакторов ВВЭР-1000 в условиях пристанционных бассейнов выдержки**

А.Н. Аблеев, **С.П. Мартыненко**, С.С. Мартыненко

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ – Москва, Россия

Система предназначена для бесконтактного измерения прогибов, углов скручивания, удлинений ТВС и размера «под ключ» в водной среде с помощью ультразвукового эхо-импульсного метода. Может быть использована в составе отечественных и иностранных стендов инспекции и ремонта. Достоинство системы – простота, надёжность, быстродействие, отсутствие влияния на ТВС. С помощью прототипа системы получена картина прогибов всех ТВС АЗ при ППР на 4-м блоке ЗАЭС.

## **Information-measuring System for Monitoring the Shape Change of Fuel Assemblies of VVER-1000 Reactors in the Conditions of On-site Spent Fuel Pools**

A.N. Ableev, **S.P. Martynenko**, S.S. Martynenko

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute) – Moscow, Russia

The system is designed for non-contact measurement of deflections, twisting angles, elongations of fuel assemblies and turnkey dimensions in an aqueous medium using the ultrasonic echo-pulse method. The system can be used as part of domestic and foreign inspection and repair stands. The advantage of the system is simplicity, reliability, speed, and no effect on fuel assemblies. With the help of the prototype of the system, a pattern of deflections of all fuel assemblies of the core was obtained during the shutdown at the 4th unit of the Zaporizhzhya NPP.

В НИЯУ МИФИ разработаны основы ультразвуковой эхо-импульсной методики контроля геометрии отработанных ТВСА в условиях бассейнов выдержки ВВЭР-1000. В отличие от контактных методов измерения [1, 2], эхо-импульсный метод не воздействует на ТВС. В результате была создана система «СИГМА-ТВСА», с помощью которой проведен контроль прогибов и углов скручивания всех ТВСА на 4-м блоке ЗАЭС.

Контролируемая кассета устанавливается с помощью перегрузочной машины внутрь измерительной позиции, состоящей из трех штанг длиной 5 м, расположенных под углом 120° друг к другу с закрепленными на них 45 пьезодатчиками (по 15 датчиков на каждой штанге), расположенных в момент измерений напротив дистанционирующих решеток (ДР) ТВСА. Среднее расстояние от ДР до датчиков около 50 мм. Контроль проводится в автоматическом режиме путем последовательной коммутации датчиков с помощью специального многоканального блока сопряжения, подсоединенного к персональному компьютеру (ПК). Полученные первичные результаты в записываются на ПК в виде временной развертки возбуждающих и отраженных импульсов для каждого датчика. Время записи данных для одной кассеты не превышает 20 сек.

В дальнейшем первичные результаты обрабатываются при помощи специальной программы. Сначала измеряются времена прихода отраженных от дистанционирующих решеток (ДР)

импульсов и вычисляются расстояния от нее до всех датчиков. Для уменьшения погрешности измерения расстояния от датчиков до дистанционирующих решёток система предварительно калибруется на имитаторе ТВСА (ИТВС), у которого отсутствуют заметные прогибы (более 1 мм) и углы скручивания (более 10). Точность измерения расстояний от датчика до ДР ~0,2 мм. Итоговым результатом является построение годографов прогибов всех ТВСА путем усреднения результатов измерений по трем парам датчиков на каждой ДР. При этом прогиб ТВСА на каждой ДР вычисляется, как расстояние относительно условной оси ТВСА, проведенной между центрами верхней и нижней ДР.

Измерение скручивания ТВСА системой «СИГМА-ТВСА» является более сложной задачей, чем измерение ее прогибов. Это связано с тем, что углы скручивания, как правило, небольшие (несколько градусов), и изменение расстояний, соответствующих этим углам, составляет доли миллиметра. Поэтому для корректного определения скручивания необходим тщательный анализ результатов с оценкой влияющих факторов. К числу таких факторов следует отнести:

- неточность установки датчиков на штанги;
- неточность установки штанг на стенде;
- возможный поворот стенда относительно осей реактора;
- градиент температур воды по высоте ТВСА;
- турбулентное движение воды вблизи поверхности ТВСА;
- ослабление отраженного сигнала при больших углах поворота ДР;
- погрешность определения расстояния (перпендикуляра) от датчика до ДР при повороте последней.

Точный анализ всех факторов вряд ли возможен. Однако, наличие большого объема данных позволяет провести обработку результатов и выработать корректный подход для получения достоверных результатов. Для этого учитывались следующие обстоятельства:

1. Измерительный стенд может иметь небольшой угол (несколько градусов) относительно осей реактора. Тогда все ТВСА устанавливаются на измерительную позицию под этим углом, который можно назвать общим углом поворота;

2. В случае, если датчик излучает сигнал не строго перпендикулярно плоскости ДР, то измеряется время распространения волны до ближайшей от него точки. При этом наблюдается растянутый во времени отраженный сигнал с плавно нарастающим передним фронтом. Тогда за момент прихода отраженной волны принимается превышение сигналом фонового (шумового) процесса;

3. Контроль расстояний от датчиков до ДР проводится с помощью пятнадцати групп датчиков (по три датчика в группе) – измерительными ячейками. При этом каждая ячейка имеет свои отклонения от идеальной геометрии и, следовательно, свои характерные погрешности измерения;

4. Каждая тройка датчиков в измерительной ячейке расположена в вершинах правильного треугольника. В этом случае среднее измеренное расстояние до кассеты не будет изменяться при плоскопараллельном перемещении и будет уменьшаться при повороте кассеты в первом приближении на величину, пропорциональную квадрату угла поворота. Если датчики измерительной ячейки не образуют правильный треугольник (вследствие неидеальности их расположения), минимум будет смещен на некоторую величину, соответствующую этой измерительной ячейке;

5. Для калибровки измерительных ячеек необходимо использование имитатора ТВСА (ИТВС), у которого отсутствуют заметные прогибы (более 1 мм) и углы скручивания (более 10);

6. Направление угла поворота ДР определить с помощью настоящей измерительной системы нельзя.

Часть передней панели программы «СИГМА-ТВСА.vi» в режиме обработки результатов имеет вид, показанный на рис. 1.

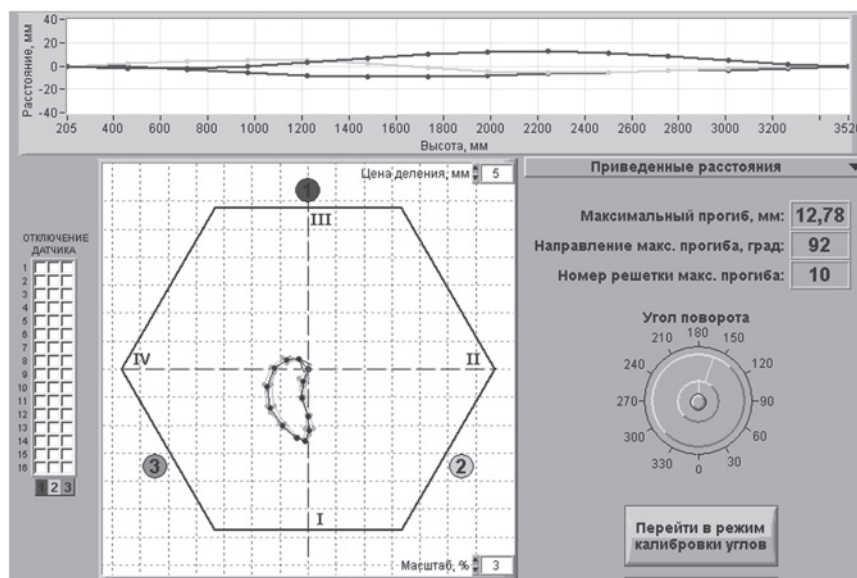


Рис. 1. Окно обработки программы «СИГМА-ТВСА.vi»

На верхнем графике показаны прогибы ТВС в направлении каждой штанги. Ниже отображается результирующий годограф прогибов. Расположение штанг относительно ТВС схематично показано кружками с цифрами 1, 2 и 3. Справа расположены индикаторы «Максимальный прогиб», «Направление максимального прогиба» и «Номер решетки максимального прогиба», отображающие соответствующие величины. При выходе из строя одного или нескольких датчиков их можно отключить в поле «Отключение датчиков». При этом система сохраняет работоспособность при повреждении до трети датчиков.

На рис. 2 показан итоговый результат годографов прогибов всех ТВСА 4-го блока ЗАЭС с привязкой к их расположению в активной зоне.

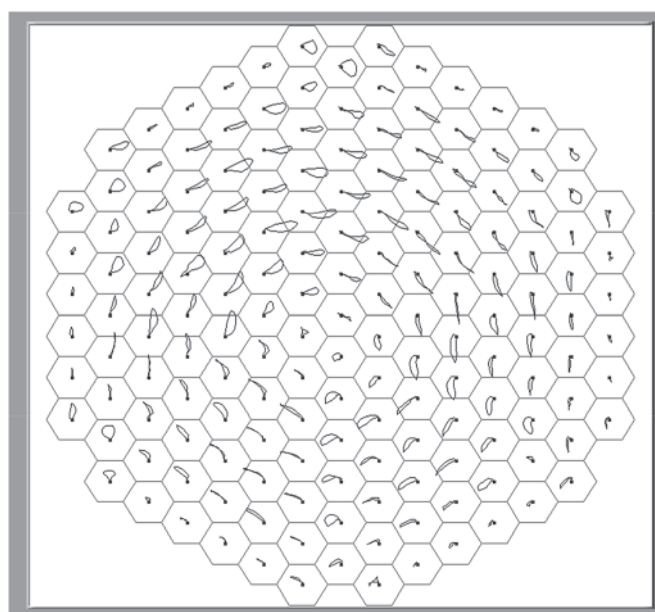


Рис. 2. Поле годографов прогибов всех ТВСА 4-го блока ЗАЭС

Из рисунка видно, что прогибы всех ТВСА направлены по часовой стрелке относительно центра активной зоны (АЗ). При этом максимальная величина прогибов наблюдается у ТВСА, расположенных на расстоянии 0,5 радиуса АЗ.

На рис. 3 показана картограмма загрузки 4-го блока ЗАЭС с данными о величине скручивания ТВСА в градусах, показанных цифрами.

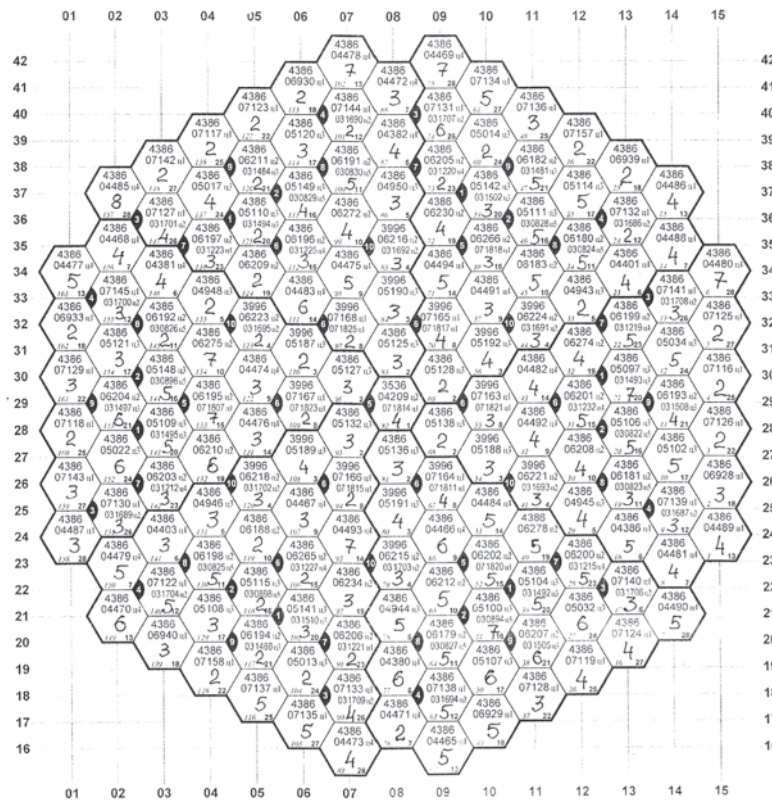


Рис. 3. Картограмма загрузки 4-го блока ЗАЭС с данными о величине скручивания ТВСА в градусах, показанных цифрами

Разработанная информационно-измерительная система и полученные с её помощью результаты служат основой для разработки промышленного варианта системы для измерения деформации ТВС, включая прогибы, углы скручивания, удлинения и размера «под ключ», и предназначенной для использования в стендах инспекции и ремонта разработки АО «ОКБМ» и ОКБ «Гидропресс».

Таким образом, полученные нами и специалистами НИИАР и ООО «Сосны» [3–5] результаты подтверждают перспективность применения эхо-импульсного метода для использования в информационно-измерительной системе контроля деформации ТВС в составе разрабатываемых пристанционных стендов инспекции и ремонта конструкции ОКБ «Гидропресс» и АО «ОКБМ».

### Список литературы

1. Методики измерения геометрических размеров и формы чехла ТВС. /В.Г. Дворецкий, В.Б. Иванов, Н.С. Глушак и др. // Препринт НИИАР-3(806). – Димитровград, 1991.
2. Исследования по проблеме, связанной с изгибом ТВС ВВЭР-1000 при эксплуатации. /В.С. Поленок, С.В. Павлов, В.П. Смирнов и др. // Сб. докл. 5-ой межотраслевой конф. по реакторному материаловедению, Димитровград, 8–12 сентября 1997 г. – Димитровград: ГНЦ РФ НИИАР. – 1998. – Т. 1. – Ч. 1. – С. 47–58.
3. Павлов С.В. Стенды инспекции, ремонта и реконструкции ТВС: Обзор. – Димитровград, НИИАР, 1996.
4. Воронина А.В. / Вестник НИЯУ МИФИ. – 2020. – Т. 9. – № 3. – С. 217–225.
5. Инженерные формулы для оценки влияния естественной конвекции у поверхности ТВС ВВЭР-1000 на результаты измерения ее размеров ультразвуковым методом в бассейне выдержки АЭС / А.В. Воронина, С.В. Павлов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2021.



## Информационно-измерительная система контроля давления гелия в твэлах реакторов ВВЭР в условиях производства

А.Н. Аблеев, **С.П. Мартыненко**, С.С. Мартыненко

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ – Москва, Россия

Система предназначена для измерения давления гелия в твэлах типа ВВЭР на автоматизированных линиях их производства с помощью ультразвукового резонансного метода. Внедрена на МСЗ и НЗХК. В настоящее время проходит метрологическую аттестацию и внедряется в качестве штатного средства контроля давления гелия в твэлах ВВЭР со смешанным уран-плутониевым топливом на СХК, а также в твэлах КВАДРАТ западного дизайна на НЗХК.

## Information and Measuring System for Monitoring Helium Pressure in Fuel Rods of VVER Reactors under Production Conditions

A.N. Ableev, **S.P. Martynenko**, S.S. Martynenko

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute) – Moscow, Russia

The system is designed to measure the helium pressure in VVER-type fuel rods on automated production lines using the ultrasonic resonance method. Implemented on JCS MSZ (Machinery Manufacturing Plant, Joint-Stock Company, ROSATOM) and NCCP (Novosibirsk Chemical Concentrates Plant, ROSATOM). Currently, it is undergoing metrological certification and is being implemented as a standard means of controlling the helium pressure in VVER fuel rods with mixed uranium-plutonium fuel at the SCC (Siberian Chemical Combine), as well as in the Western design TVS-K fuel rods at the NCCP.

Основы ультразвукового метода контроля давления гелия в твэлах с таблетированным топливом базируются на возбуждении и регистрации параметров окружных резонансных механических колебаний оболочки в области топливного столба. Такие колебания являются одним из типов нормальных колебаний оболочки, аналогичных продольным и изгибным колебаниям стержней, и определяются возникновением стоячей волны (резонанса) в окружном направлении оболочки на характерных частотах, называемых резонансными частотами [1, 2]. Особенностью окружных колебаний является то, что они могут быть локализованы на кольцевом участке высотой порядка двух-трех диаметров оболочки. При этом в качестве информативных параметров возможно использование следующих характеристик резонансных пиков: добротность  $Q_n$ , и резонансные частоты  $\omega_n$ , где  $n$  – номер гармоники. Увеличение давления гелия в твэле приводит к улучшению акустического согласования между таблетками и оболочкой и изменению как добротностей, так и резонансных частот последней.

Особенности окружных резонансов:

1. Локализация колебаний на участке 2–3 диаметра оболочки твэла;
2. Возможность измерения давления гелия и его чистоты по длине твэла;
3. Возможность измерения толщины стенки оболочек по длине твэла.

Характер влияния давления гелия на резонансные свойства оболочки показан на рис. 1, на котором условно изображён участок амплитудно-частотной характеристики оболочки-таблет-

ки вблизи радиального резонанса таблеток  $\Omega_0$ . Стрелками показано смещение резонансных частот оболочки  $\omega_n$  при повышении давления гелия.

Отметим основные особенности резонансных пиков оболочки при изменении давления гелия:

1. Добротность пиков тем ниже, чем ближе их резонансная частота к резонансной частоте радиальных колебаний таблеток  $\Omega_0$ ;
2. Добротность всех пиков понижается при повышении давления;
3. Частоты  $\omega_n > \Omega_0$  при повышении давления повышаются, причем тем сильнее, чем ближе они находятся к точке перегиба на резонансной кривой, характеризующей таблетки;
4. Частоты  $\omega_n < \Omega_0$  при повышении давления понижаются, причем тем сильнее, чем ближе они находятся к точке перегиба на резонансной кривой, характеризующей таблетки.

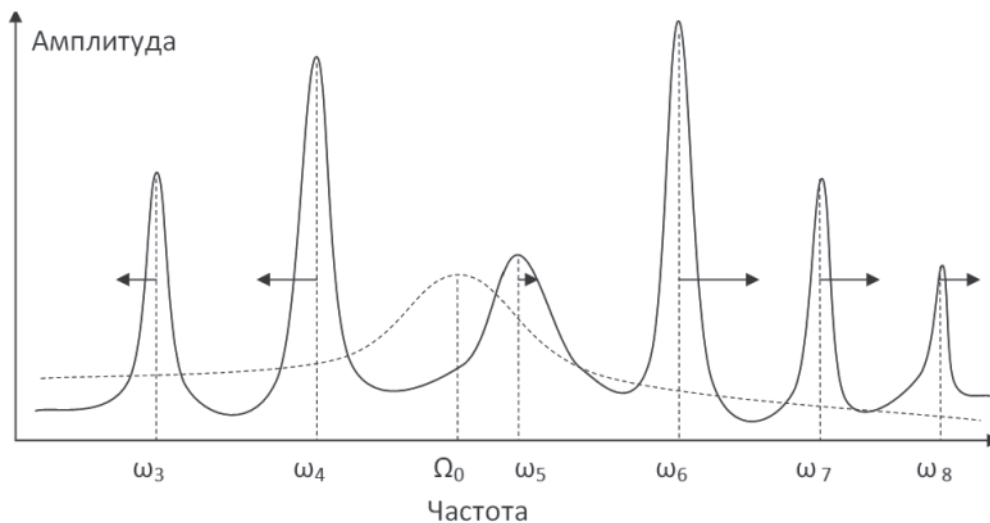


Рис. 1. Резонансный спектр оболочки вблизи радиального резонанса таблеток  $\Omega_0$ .

Стрелками показано смещение резонансных частот оболочки  $\omega_n$  при повышении давления гелия

Для измерений можно использовать от 4 (для твэлов ВВЭР-440) до 8 (для твэлов ВВЭР-1000) однотипных измерительных узлов по длине твэла. Структурная схема одного измерительного узла показана на рис. 2. Он состоит из возбуждающего 1 и приемного 2 пьезопреобразователей, демпферов 9, необходимых для демпфирования паразитных резонансов оболочки твэла, а также системы фиксации, состоящей из узла крепления 10 пьезопреобразователей с демпферами и пневмопривода «Festo» 11. Блок 12 необходим для продольного перемещения твэла 13 на измерительной позиции с помощью электромотора 14 и управления пневмоприводом «Festo». Управление работой всей системы осуществляется через блок сопряжения персональным компьютером 8. Усилитель 15 служит для предварительного усиления сигнала.

Блок сопряжения (БС) обеспечивает необходимые режимы возбуждения и регистрации колебаний пьезопреобразователей, а также синхронизацию работы всех узлов установки и коммутацию измерительных узлов. Для возбуждения колебаний служит синтезатор частоты 7, сигнал с которого поступает на пьезопреобразователь 1. Для регистрации колебаний приёмного пьезопреобразователя 2 используется усилитель 3, сигнал с которого выпрямляется в детекторе 4, далее поступает на аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) 5, а затем в цифровой форме поступает на устройство сопряжения 6. Далее сигнал по последовательному порту передается на ПК 8.

На рис. 3 показана градуировочная зависимость акустического параметра, являющегося комбинацией 3-х информативных частот, от давления гелия в стандартных образцах предприятия (СОП) и используемая для измерения давления гелия в штатных твэлах ВВЭР-440 и ВВЭР-1000.

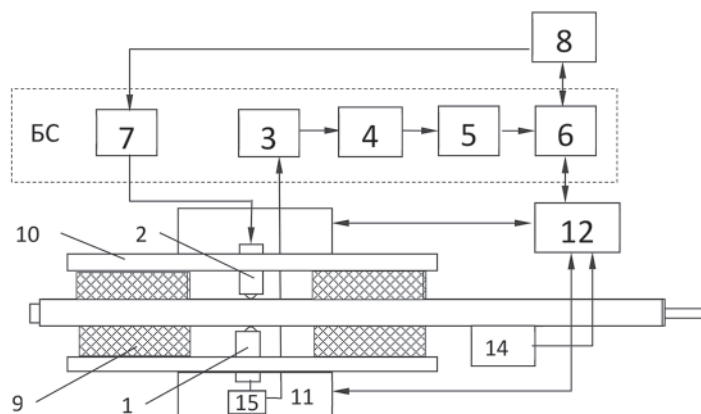


Рис. 2. Структурная схема измерительной позиции:

- 1, 2 – пьезопреобразователи; 3 – программируемый усилитель; 4 – детектор; 5 – АЦП; 6 – устройство сопряжения;  
 7 – синтезатор частоты; 8 – персональный компьютер; 9 – демпферы; 10 – узел крепления;  
 11 – пневмоприводы «Festo»; 12 – блок сопряжения; 13 – твэл; 14 – электропривод; 15 – усилитель

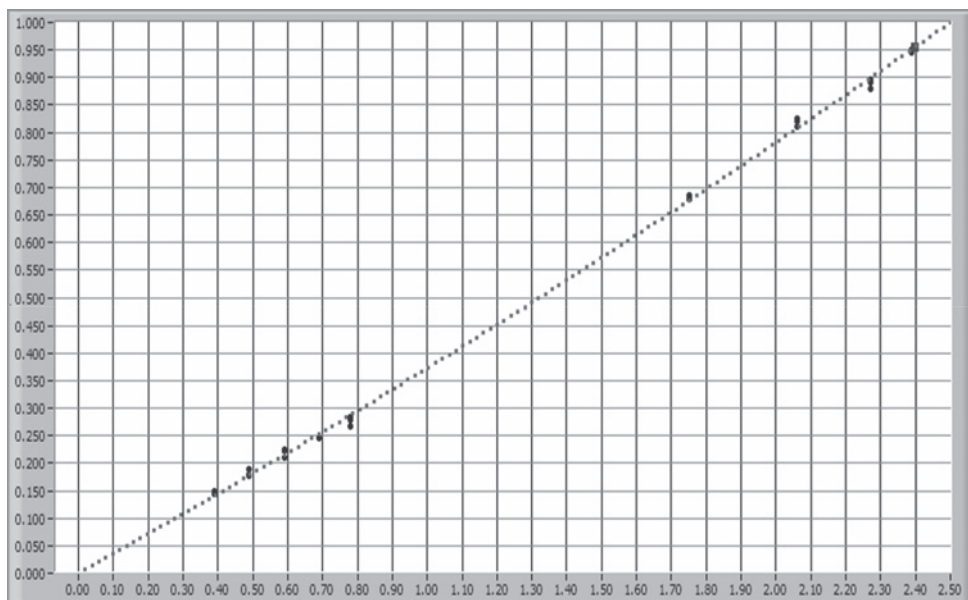


Рис. 3. Градуировочная зависимость информативного параметра от давления гелия в твэлах ВВЭР-440 и ВВЭР-1000

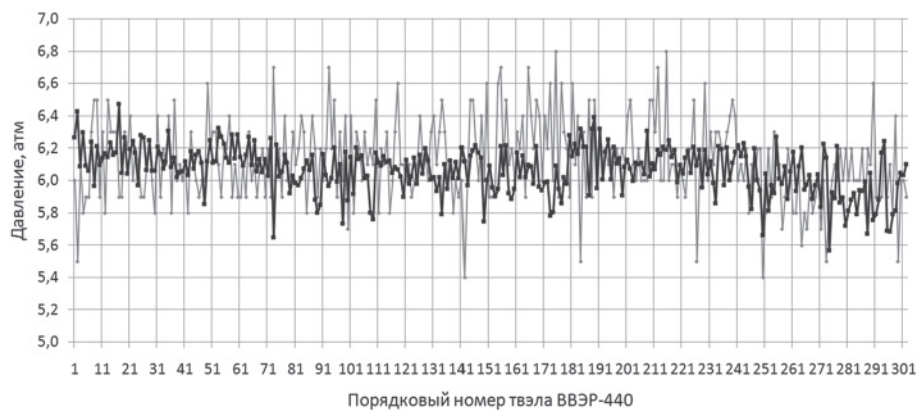


Рис. 4. Сравнительные данные измерений давления гелия в твэлах ВВЭР-440 тепловым методом (серая линия) и ультразвуковым методом (чёрная линия)

На рис. 5 показаны флуктуации толщины стенки твэлов ВВЭР, измеренных ультразвуковым методом. Из рисунка видно, что толщины стенок группируются по 50 штук, соответствующих количеству оболочек в стандартной упаковке завода-производителя.



Рис. 5. Флуктуации толщины стенки твэлов ВВЭР-440, измеренных ультразвуковым методом

Полученные результаты свидетельствуют о высокой информативности резонансного метода контроля давления гелия в твэлах с таблетированным топливом, а также для измерения толщины стенки оболочек твэл, что позволяет использовать метод и информационно-измерительные системы на его основе в качестве точного и надёжного средства контроля широкого спектра изделий, включая твэлы ВВЭР-440, ВВЭР-1000, твэлы КВАДРАТ западного дизайна и т.д.

### Список литературы

1. Михасев Г.И., Товстик П.Е. Локализованные колебания и волны в тонких оболочках. Асимптотические методы. – М.: Физматлит, 2009. – 290 с.
2. Лабораторный практикум «Безопасность и надёжность ЯЭУ»: учебное пособие для вузов / А.Н. Аблеев, Б.Ф. Ануфриев, Е.М. Кудрявцев, С.П. Мартыненко. – М.: МИФИ, 2007. – 60 с.
3. Теплофизические средства неразрушающего исследования герметичности и параметров газа в твэлах реакторов. / В.В. Пастушин, А.Ю. Новиков, А.В. Зеленчук, Ю.К. Библашвили // Атомная энергия. – Т. 80. – №1. – 1996. – С. 20–26.
4. Термоакустическая система неразрушающего контроля давления в твэлах и пэлах ядерных реакторов. / А.Н. Аблеев, Б.Ф. Ануфриев, Т.М. Халфин и др. // Научная сессия МИФИ – 2000. Сб. научн. трудов. – 2000. – Ч. 8. – С. 191–192.

## Опыт проектирования и разработки автоматизированной системы управления технологической системой ИТЭР

А.Ю. Миронов<sup>1</sup>, Н.В. Нагорный<sup>1</sup>, А.А. Звонарева<sup>1</sup>, М.К. Журавлёв<sup>1</sup>,  
Д.И. Гужев<sup>1</sup>, А.И. Николаев<sup>1</sup>, к.т.н. А.О. Толоконский<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Частное учреждение Госкорпорации «Росатом» «Проектный центр ИТЭР» – Москва, Россия;

<sup>2</sup> Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ – Москва, Россия

Разработка автоматизированных систем управления для диагностических и технологических систем ИТЭР является непростой задачей ввиду специфики работы установки, особых требований по ядерной безопасности французского регулятора, а также уникальной SCADA системы, которая разрабатывается исключительно для ИТЭР.

В начале проектирования каждый разработчик сталкивается с большим объемом новых для него требований и правил, по которым необходимо проектировать как АСУ, так и всю систему в целом для обеспечения дальнейшей интеграции в комплекс установки. В настоящий момент подавляющее большинство диагностических систем находится на стадии предварительного проектирования (PDR), и лишь немногие прошли или подходят к стадии финального проекта (FDR).

В данной работе представлен опыт проектирования и разработки автоматизированной системы управления для технологической системы ИТЭР.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 11.05.2021 г. №Н.4а.241.19.21.1038.

## The Main Sources of Software Control Systems Failures and Approaches to their Prevention

A.Yu Mironov<sup>1</sup>, N.V. Nagornyj<sup>1</sup>, A.A. Zvonareva<sup>1</sup>, M.K. Zhuravlev<sup>1</sup>,  
D.I. Gujev<sup>1</sup>, A.I. Nikolaev<sup>1</sup>, PhD A.O. Tolokonskiy<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institution "Project Center ITER" – Moscow, Russia;

<sup>2</sup> National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute) – Moscow, Russia

The development of instrumentation and control systems for ITER diagnostic and technological systems is an extremely non-trivial task associated with the specifics of the operation of the facility, the special nuclear French regulator safety requirements, as well as the unique SCADA system, which is used exclusively for the ITER machine.

At the beginning of the design, each developer is faced with a large number of new requirements and rules, according to the conditions of which it is necessary to design the I&C system.

This paper presents the experience of designing and developing an emergency control system for the ITER process system based on the CODAC Core system.

The work was carried out in accordance with the state contract No. N.4a.241.19.21.1038 dated 11.05.2021.

Система управления установкой ИТЭР разделена на два уровня управления – центральный и нижний локальный уровень управления, состоящий из более чем 130 технологических и диагностических подсистем установки.



В процессе проектирования и разработки автоматизированных систем управления (АСУ) для технологических и диагностических систем ИТЭР выделяют следующие основные стадии:

- 1) стадия концептуального проектирования (CDR – Conceptual Design Review);
- 2) стадия предварительного проектирования (PDR - Preliminary Design Review);
- 3) стадия финального проектирования (FDR - Final Design Review);
- 4) подготовка к производству и производство (MRR – Manufacturing Readiness Review);
- 5) приемочные испытания на стороне исполнителя (FAT – Factory Acceptance Test);
- 6) приемочные испытания на объекте (SAT – Site Acceptance Test).

В данном докладе рассматривается опыт прохождения всех вышеперечисленных стадий на примере автоматизированной системы управления для технологической системы ИТЭР.

На этапе концептуального дизайна исполнитель изучает ключевые документы с описанием технологической системы, а также документы с требованиями Международной Организации (МО) ИТЭР к разработке и проектированию автоматизированных систем.

Например, документ Annex B, являясь техническим заданием к договору поставки системы, содержит описание самой технологической системы, документ Plant Control Design Handbook [1] регламентирует основной перечень документации для каждого из этапов разработки и проектирования системы и требования к ним, а документ Electrical Design Handbook [2] содержит требования и правила по электробезопасности.

На этапе концептуального дизайна подготавливаются первые версии следующих документов:

- [D1] Функциональная архитектура и функциональный анализ АСУ;
- [D5] Перечень медленных и быстрых контроллеров, которые будут использоваться для разработки АСУ;
- [D6] Перечень сигналов;
- [D7] Перечень интерфейсов взаимодействия с центральной системой управления ИТЭР;
- [D8] Описание стоек управления, спецификации оборудования в стойках, а также расчеты по тепловыделению оборудования внутри стоек;
- [D9] Описание машин состояний АСУ.

Вышеперечисленные документы подготавливаются к защите перед экспертной комиссией МО ИТЭР. В ходе защиты комиссия формирует перечень замечаний, которые необходимо устранить перед тем, как перейти на следующую стадию проектирования. Замечания делятся на три категории:

- замечания первой категории. Без устранения замечаний данной категории переход к следующей стадии не представляется возможным;
- замечания второй категории. Данную категорию замечаний необходимо устранить в ближайшее время после перехода на следующую стадию;
- замечания третьей категории. Их нужно устранить до защиты следующей стадии.

После устранения замечаний первой категории скорректированные версии отчетных документов публикуются для проверки со стороны МО ИТЭР. После подтверждения того, что замечания первой категории устранены, начинается стадия предварительного дизайна (PDR). Ввиду того, что стадии CDR и PDR могут продолжаться длительное время, перечень оборудования как объекта управления, так и АСУ до стадии FDR, как правило, подлежит изменениям. Поэтому при выборе оборудования стоит учитывать, как долго производитель данного оборудования будет выпускать отобранные модели устройства. Также на стадии PDR корректируется и детализируется архитектура АСУ. Кроме того, исполнитель начинает детально анализировать требования МО ИТЭР к разработке программного обеспечения (ПО).

Защита PDR проходит с приглашением внешних экспертов в области систем управления, а также экспертов по разрабатываемой технологической системе. Длительность защиты материалов зависит от уровня детализации этапа предварительного проекта и может составлять несколько дней, защита проходит очно на площадке МО ИТЭР (Франция).

Финальная стадия проектирования – одна из важнейших стадий всего проектирования. На ней финализируются документы D1-D9, а также подготавливаются документы, которые включают в себя описание расположения оборудования на конечном объекте во Франции, кабельный журнал [3], описание ПО, техническое задание на разработку ПО и другие.

Защита FDR перед комиссией МО ИТЭР – это одно из важнейших событий цикла всей разработки автоматизированной системы, которое также проходит очно на площадке МО ИТЭР.

После защиты FDR и закрытия замечаний первой категории, а значит, утверждения итоговых проектных решений, становится возможной закупка стоек управления, а также всего оборудования и вспомогательных материалов, необходимых для создания АСУ. Разработка ПО согласно методологии ИТЭР также должна начинаться на данном этапе, но на практике она начинается еще на стадии FDR за счет создания прототипов автоматизированной системы. Прототип создается с учётом особенностей SCADA системы ИТЭР. Она носит название CODAC Core System (CCS) [4] и была разработана исключительно для международного проекта по созданию экспериментального термоядерного реактора. На стадии MRR все ПО необходимо интегрировать с CCS и разработать человеко-машинные интерфейсы (HMI), к которым МО ИТЭР также предъявляет специальные требования, описанные в документе [5].

На этапе MRR, как правило, создается специальный симулятор, с помощью которого можно испытать АСУ до подключения к технологической системе напрямую. На практике симулятор незаменим, так как при проведении предварительных тестов АСУ с симулятором выявляются недоработки ПО, а также необходимость корректировки документации. Очной защиты MRR во Франции, как правило, не проводится, в свою очередь, МО ИТЭР утверждает весь пакет документации на АСУ и согласовывает с исполнителем сроки проведения заводских испытаний на его стороне. На этапе MRR также разрабатывается программа и методика испытаний (ПМИ). ПМИ может содержать тысячи страниц. Несмотря на это, тесты с симулятором обычно проводятся в соответствии с ПМИ, чтобы максимально подготовиться к стадии FAT.

Заводские испытания могут длиться более года по различным причинам. Случается так, что сама технологическая система еще не готова к испытаниям, а бывает и так, что в процессе тестирования АСУ с симулятором выявляются недоработки, которые устраняются несколько месяцев с повторным прохождением тестов с симулятором. Подготовка к заводским испытаниям также занимает длительное время, стойки управления перемещаются в помещение, где находится технологическая система, и начинается процесс монтажа и наладки. После того как наладка АСУ завершена, строго по ПМИ проводятся предварительные испытания в присутствии исполнителя и всех задействованных подрядчиков. За 14 дней до готовности к проведению FAT в МО ИТЭР отправляется уведомление с приглашением очно присутствовать на испытаниях.

Для того чтобы полностью проверить функционал ПМИ, на заводских испытаниях используются инженерные (глубокого уровня конфигурации и мониторинга) человеко-машинные интерфейсы. После успешного проведения FAT создаются дополнительные человеко-машинные интерфейсы, адаптированные под запросы оператора технологической системы. В свою очередь, инженерные HMI остаются в финальной версии ПО перед отправкой технологической системы и ее АСУ во Францию. Важно отметить, что заводские испытания АСУ с технологической системой часто проводятся без какого-либо участия (даже симуляции) центральной системы управления ИТЭР ввиду того, что интеграция локальной АСУ для технологической системы будет производиться на стадии SAT во Франции. Перед отправкой

АСУ должна быть сертифицирована по европейским стандартам для возможности ее ввоза на территорию Франции.

Испытания во Франции проводятся в несколько этапов: сначала АСУ проверяется с симулятором в присутствии специалистов по АСУ из МО ИТЭР, далее в результате совместной деятельности с центральной командой CODAC осуществляется интеграция локальной системы управления для разработанной технологической системы с центральной системой управления ИТЭР. В ходе этих работ корректируется финальная ПМИ и проводятся испытания на стороне заказчика.

Опыт разработки и проектирования АСУ для технологических систем ИТЭР следует применять при разработке и проектировании АСУ для диагностических систем ИТЭР, которое находится еще на ранней стадии проектирования.

### **Список литературы**

1. J-Y. Journeaux, A. Wallander. Plant Control Design Handbook (report). ITR-20-009 (2020)
2. J. Hourtoule. ITER Electrical Design Handbook Codes & Standards (report). ITR-20-005 (2020).
3. D. Beltran. ITER Cabling Handbook (report). ITR-21-010 (2021).
4. Wei Zheng et al. “Designing CODAC system for tokamaks using web technology”. Fusion Engineering and Design, Vol. 146. P. 2379-2383 (2019).
5. Dario Leone et al. “EPICS application for ITER RH supervisory control system”. Fusion Engineering and Design, Vol. 169. 112429 (2021).

## **Возможности искусственного интеллекта для обеспечения безопасности ядерно опасных объектов и контроля технологических процессов**

**А.А. Мясун**

АО «ФЦНИВТ «СНПО «Элерон» – Москва, Россия

В докладе рассматриваются возможности современных нейросетевых алгоритмов в решении задач обеспечения безопасности объектов различной степени важности, контроля действий персонала объектов при выполнении им служебных обязанностей. Приведены ключевые особенности современных систем видеонаблюдения, рассмотрены задачи, стоящие перед современной видеоаналитикой, а также перспективы дальнейшего развития.

## **Artificial Intelligence Capabilities to Ensure the Safety of Nuclear Hazardous Facilities and Process Control**

**A.A. Myaun**

JSC FCS&HT "SNPO "Eleron" – Moscow, Russia

The report discusses the possibilities of modern neural network algorithms that solving the problems of ensuring the security of important objects, monitoring the actions of the personnel of objects in the performance of their official duties. The key features of modern video surveillance systems are given, the tasks facing modern video analytics are considered, as well as the prospects for further development.

В обеспечении безопасности и физической защиты объектов важное значение имеет своевременный и постоянный контроль оперативной обстановки, которая наиболее полно определяется видеоинформацией о событиях, происходящих на подступах к территории объекта, в его зданиях и сооружениях, в том числе и о действиях в них персонала объекта в целях предотвращения различного вида угроз со стороны внешних и внутренних нарушителей.

Главным источником такой видеоинформации является система видеонаблюдения, предназначенная для обеспечения визуального контроля над территорией или определенными зонами объекта.

В системах видеонаблюдения на протяжении последних десятилетий можно отметить активное внедрение алгоритмов интеллектуальной обработки видеоинформации.

Видеоаналитика — это программное обеспечение, позволяющее автоматизировать такие функции средств охраны, как обнаружение, слежение, распознавание, идентификация, прогнозирование. В основе программного обеспечения видеоаналитики лежит комплекс алгоритмов машинного зрения, позволяющих вести видеомониторинг и проводить анализ данных без прямого участия человека.

К числу самых передовых способов решения задач обработки и анализа изображений следует отнести использование искусственных нейронных сетей.

Классической задачей видеоаналитики является детекция движения и сопровождение объекта. Алгоритмы машинного зрения позволяют добиться неплохих результатов, но при этом имеют определенные недостатки, например, высокая чувствительность к изменениям на сцене,

зависимость от освещенности, потеря трека при пересечении путей нескольких сопровождаемых объектов. Алгоритм детекции движения является базой для большого числа детекторов, применяемых для обеспечения безопасности ядерно опасных объектов, поэтому увеличение качества работы такого детектора напрямую влияет на качество работы системы в целом. Новым этапом развития детекторов данного типа стало применение нейросетевых технологий, а именно, глубоких сверточных сетей, которые позволили с высокой вероятностью классифицировать объекты по различным типам, а также качественно улучшить сопровождение объекта. Для сопровождения объекта требуется обнаружить целевой объект на последовательности кадров, после чего провести корреляцию между найденными объектами на каждом из кадров, алгоритм работы приведен на рис. 1.

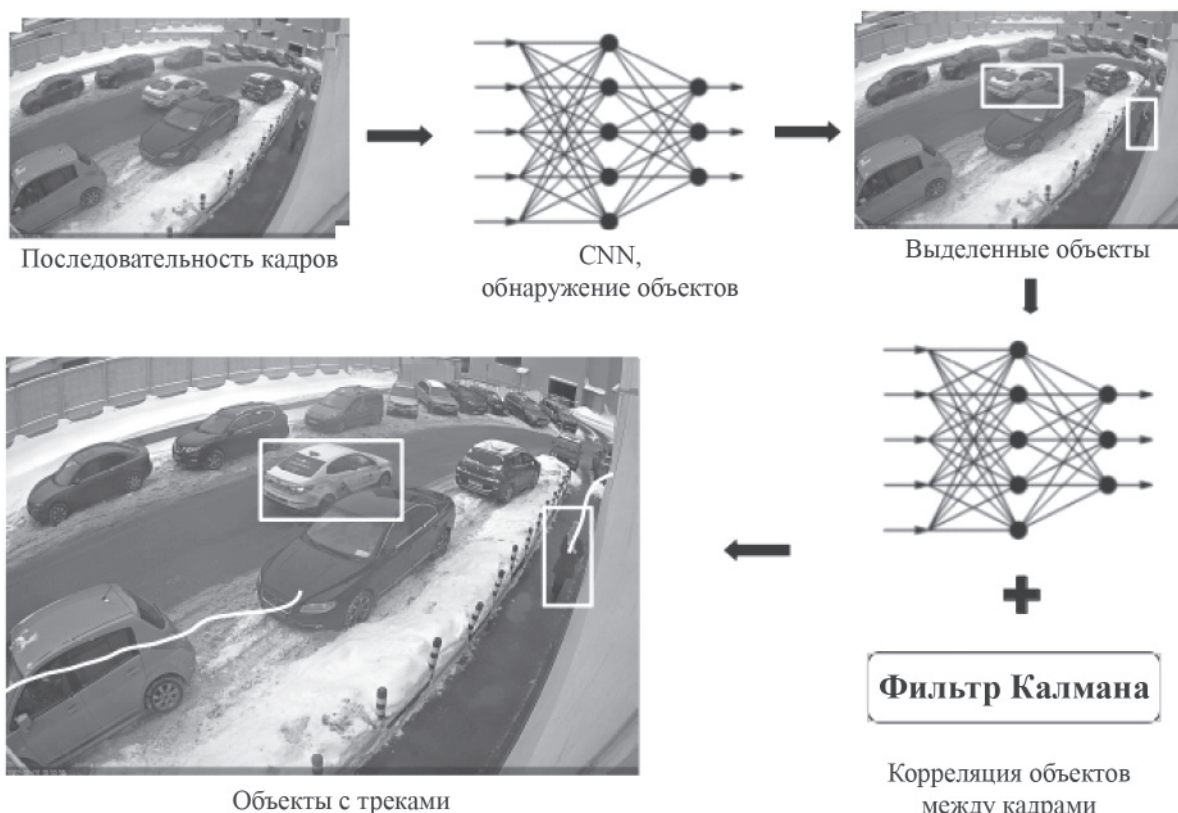


Рис. 1. Построение траектории объекта

Детектор движения позволяет решать следующие задачи:

- пересечение линии;
- вход, приближение к охраняемой зоне;
- контроль движения в заданном направлении;
- обнаружение оставленного предмета;
- контроль нахождения требуемого количества людей в зоне;
- реализация различных сценариев прохода зоны в зависимости от типа объекта;
- сопровождение объекта поворотной камерой.

Основная область применения глубоких сверточных нейронных сетей заключается в эффективном распознавании образов. Данный тип сети является одним из лучших алгоритмов по распознаванию и классификации изображений, и он относительно устойчив к повороту и



сдвигу распознаваемого изображения, поэтому подходит для решения большого спектра других задач обеспечения безопасности, например, детекции совершения каких-либо противоправных или вандальных действий в отношении тех или иных конструкций. Данная задача на сегодняшний день остается слабо формализованной, но некоторые ситуации все же можно описать, собрав достаточную для обучения сети выборку. Такими признаками могут быть:

- яркая вспышка;
- пожар/задымление.

Детекторы дыма и огня возможно применять в местах, где физически не возможна установка датчика дыма, например открытые территории. Детектор яркой вспышки может своевременно обратить внимание оператора на нестандартную ситуацию, а в случае подтверждения опасности принять соответствующие меры.

Другой важной задачей обеспечения безопасности является обнаружение признаков аномального/асоциального поведения, например, драки. Для решения такого типа задач могут быть использованы нейросетевые алгоритмы видеоанализа, основанные на выделении ключевых точек тела человека и построении так называемого «скелета», по которому с помощью дополнительной математической обработки может быть определено положение частей тела человека на кадре, детектировано перекрытие тех или иных ключевых точек тела человека частями тела другого человека, что может потенциально свидетельствовать о признаках драки.

Один из вариантов математической модели детекции скелета человека в виде графа, где вершинами являются суставы, а ребрами – кости, реализован во фреймворке *pictorial structures model* еще в 1973 году.

Оценка позы человека – это метод компьютерного зрения, используемый для прогнозирования положения/позы частей тела или положения суставов человека.

На сегодняшний день разработаны нейросетевые алгоритмы, позволяющие в реальном времени строить «скелетики» больших танцевальных коллективов, т.е. алгоритм адаптирован к динамичным сценам с большим количеством участников. Кроме обнаружения драки, данные методы могут позволить детектировать падение человека или обеспечить соблюдение техники безопасности на объекте, например, требование, что при спуске по лестнице необходимо держаться за перила.

Нейросетевые технологии также применяются для верификации личности персонала объекта. Биометрическая аутентификация обладает значительными преимуществами по сравнению с другими способами аутентификации. Биометрические идентификаторы являются физиологическими признаками человека, которые присущи каждому, уникальны, практически не изменяются со временем, более того, подделка такого идентификатора также является сложной задачей. Одним из таких биометрических признаков является лицо. При помощи нейронной сети из изображения лица выделяются ключевые признаки, которые используются как биометрический шаблон при проведении процедуры верификации личности. Современный уровень развития нейросетевых алгоритмов позволяет осуществлять верификацию личности даже в том случае, если человек находится в медицинской маске, что является важным фактором при организации пропускного режима в период пандемии.

Ещё одной важной областью применения нейросетевых технологий является распознавание текста. Существующие классические алгоритмы, которые на протяжении многих лет справляются с хорошо формализованными задачами распознавания текста, такими как распознавание автомобильного номера, где табличка с номером имеет четко прописанные стандарты, плохо применимы, например, к распознаванию произвольного текста. В данном случае, применяя нейросетевые технологии, появляется возможность расширить перечень задач текстового распознавания.

Применяя описанные выше подходы, появляется возможность для решения комплексных задач мониторинга персонала, таких как контроль соблюдения регламентов выполнения технологической операции. Целью контроля соблюдения технологических операций является:

- проверка соответствия фактического выполнения технологического процесса (операции) предъявляемым требованиям для обеспечения стабильности качества выпускаемой и ремонтируемой продукции;
- выявление причин, конкретных виновников нарушений;
- принятие мер по устранению возможных нарушений технологических процессов;
- исключение производственного брака и повышение стабильности качества выпускаемой продукции;
- предупреждение производственного травматизма, повышение культуры производства, улучшение организации производства и охраны окружающей среды.

Контроль проведения технологических операций осуществляется в целях обеспечения соблюдения технологических регламентов, режима и предупреждения ошибок, связанных с человеческим фактором.

Несмотря на перечисленные выше достоинства применения современных технологий, увеличение перечня детектируемых ситуаций и использование нейросетевых алгоритмов приводит к увеличению потребляемых ресурсов и вычислительных мощностей. Использование серверной видеоаналитики требует применения высокопроизводительных процессоров и видеокарт, что, в свою очередь, приводит к удорожанию системы и увеличению сетевого трафика. В это же время осуществление обработки видеосигнала с нескольких камер является критическим местом, т.к. выход из строя одного сервера влечет за собой потерю функционала для этих камер. Современные технологии позволяют использовать компактные решения, такие как нейросетевые процессоры и платы, которые можно интегрировать в камеру. Таким образом, появляется возможность использования нейросетевой аналитики на борту видеокамеры, что позволяет строить интеллектуальную отказоустойчивую распределенную вычислительную систему. Данное направление является перспективным, и некоторые производители видеокамер уже реализуют бортовую видеоаналитику с применением нейросетевых технологий.

На сегодняшний день ведущие производители и разработчики охранных систем и средств идут по пути использования нейросетевых технологий, а также по пути наделения интеллектом периферийных устройств и создания распределенных интеллектуальных систем, способных обеспечить высокий уровень защиты объектов от действий со стороны внешних и внутренних нарушителей.

## Опыт применения современных аппаратных и программных средств для потоковой обработки научных данных физических установок

**Н.В. Нагорный**<sup>1</sup>, А.А. Звонарева<sup>1</sup>, А.Ю. Миронов<sup>1</sup>, Е.Ю. Миронова<sup>1</sup>,  
М.К. Журавлёв<sup>1</sup>, Д.И. Гужев<sup>1</sup>, А.И. Николаев<sup>1</sup>, к.т.н. А.О. Толоконский<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Частное учреждение Госкорпорации «Росатом» «Проектный центр ИТЭР» – Москва, Россия;

<sup>2</sup> Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ – Москва, Россия

Экспериментальные исследования физических процессов сегодня выполняются с помощью большого количества различных физических установок, в масштабах от небольших лабораторных до мегасайенс проектов. Каждый такой проект предполагает получение научных данных в ходе эксперимента, и чем сложнее установка и изучаемый физический процесс, тем важнее связь между управлением экспериментом и учётом результатов анализа, получаемых в процессе эксперимента научных данных.

В данной работе представлен опыт применения современных аппаратных и программных средств для выполнения потоковой обработки информации, поступающей с измерительного оборудования в различных системах физических установок, и достижения высокой скорости обратной связи с системами управления и экспериментатором.

## Experience in the Use of Modern Hardware and Software for Streaming Processing of Scientific Data from Physical Installations

**N.V. Nagorny**<sup>1</sup>, A.A. Zvonareva<sup>1</sup>, A.Y. Mironov<sup>1</sup>, E.Y. Mironova<sup>1</sup>,  
M.K. Zhuravlev<sup>1</sup>, D.I. Guzhev<sup>1</sup>, A.I. Nikolaev<sup>1</sup>, A.O. Tolokonskyi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institution "Project Center ITER" – Moscow, Russia;

<sup>2</sup> National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute) – Moscow, Russia

Experimental studies of physical processes today are carried out using a large number of different physics installations, ranging from small laboratory projects to mega-science projects. Each project involves acquisition of scientific data during the experiment, and the more complex the installation and the studied physical process, the more important the relationship between the control of the experiment and considering the analysis results of scientific data obtained during the experiment.

This paper presents the experience of modern hardware and software usage for online processing of data coming from measuring equipment in various systems of physical installations and achieving a high speed of feedback with control systems and the experimenter.

### Введение

В современных проектах научных экспериментов распространены различные измерительные каналы, включающие в себя цепи измерения физических явлений, состоящие из датчиков и детекторов, первичных преобразователей, различных средств передачи сигналов и развязок,

аналогово-цифровых преобразователей, аппаратуры для обработки получаемой информации и системы управления. Каждый уровень иерархии системы, содержащий цифровые устройства, также содержит и программное обеспечение.

Анализу научных данных, под которым можно понимать работу с сохранёнными данными после эксперимента либо учёт результатов автоматической обработки данных системами управления во время эксперимента, предшествуют получение данных и их потоковая обработка на разных уровнях аппаратной и программной иерархии измерительной системы. Такая иерархия может включать обработку данных сразу после АЦП с помощью жёсткой логики, перепрограммируемых логических интегральных схем (ПЛИС) и выполнение преобразований данных с помощью микроконтроллеров для последующей передачи в компьютер. Выполнение операций с данными в операционной системе компьютера происходит с использованием различных аппаратных ресурсов, таких как ядра процессоров, память, графических процессоров, а также программных средств. Конечная обработка данных может выполняться на уровне центральной системы управления установкой.

### Типовая архитектура системы сбора и обработки данных

Архитектура систем сбора и обработки данных во многом зависит от предполагаемых условий эксплуатации системы. Неблагоприятная для электроники электромагнитная обстановка, радиация и герметичные помещения не позволят определить систему в виде единого устройства, расположенного рядом с детекторами. На рис. 1 представлена типовая архитектура системы сбора и обработки данных, включающая в состав аналоговые детекторы, предварительные усилители, аппаратуру управления предусилителями, блоки передачи сигналов по оптическим линиям связи с целью гальванической развязки системы и разделения заземления физической установки от измерительной аппаратуры. Переданный от предусилителей сигнал преобразуется из оптического назад в электрический и поступает на входы аналогово-цифровых преобразователей, далее цифровые коды подвергаются математическим преобразованиям на разных уровнях цифровой системы. Несмотря на то, что аналоговая часть системы содержит преобразователи (усилители, фильтры, передатчики), которые выполняют действия с сигналом, обработкой данных принято считать преобразования, выполняемые с кодами в цифровой части системы [1].

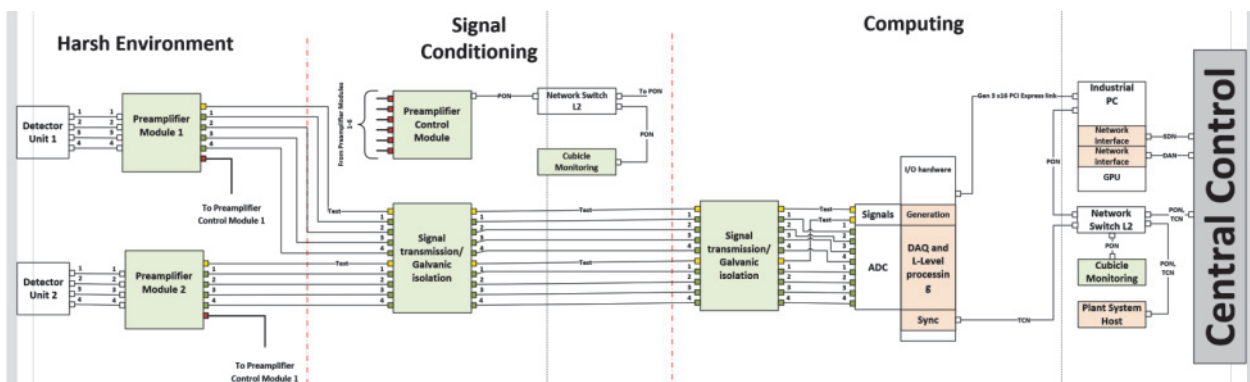


Рис. 1. Пример архитектуры системы сбора и обработки данных

Другим примером типовой архитектуры системы сбора и обработки данных являются системы, выполняющие измерения с помощью так называемых интеллектуальных датчиков, содержащих аналогово-цифровые преобразователи в своём составе. Хорошими примерами по-

добных систем являются измерительные системы технологических параметров, получающие от датчиков сразу цифровую информацию, и системы, содержащие сложные измерительные устройства, такие как научные видеокамеры (рис. 2).

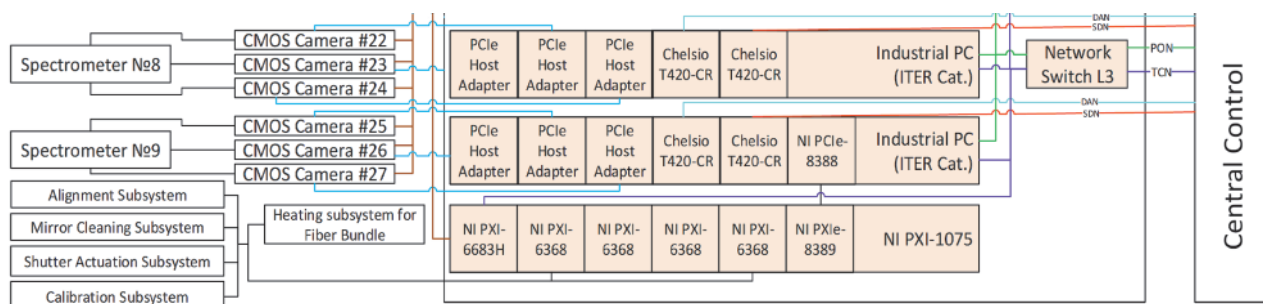


Рис. 2. Архитектура оптической измерительной системы

В представленных выше примерах средства потоковой обработки оцифрованных сигналов также разделяются на несколько уровней, каждый из которых включает в себя программно-аппаратные решения. Так, «сырой» цифровой сигнал, представляющий собой поток кодов АЦП, подвергается логическим преобразованиям (ПЛИС в составе устройства сбора данных или научной CMOS камеры), операциям, выполняемым с помощью микроконтроллеров (сжатие, упаковка данных). На компьютере в таком случае происходят более сложные и долгие вычисления физических параметров изучаемого процесса, с помощью алгоритмов, выполняемых с использованием центрального процессора, графических ускорителей и памяти компьютера.

Потоковая обработка данных во время выполнения эксперимента требует необходимой производительности вычислительных аппаратных компонентов и программного обеспечения.

### Программное обеспечение

Для того чтобы справиться с большим потоком цифровых кодов (высокоскоростные АЦП с частотой дискретизации более 500 МГц) или выполнять специфические логические операции параллельно (обработка различных областей CMOS матрицы), широко используются ПЛИС микросхемы, логика работы которых не определяется при изготовлении, а задаётся посредством программирования. «Прошивка» ПЛИС создаётся в специализированных (зависит от производителя оборудования) средах разработки, таких как LabView FPGA, Xilinx Vivado, Intel Quartus. С помощью ПЛИС могут выполняться задачи определения и коррекции базовой линии сигнала, поиска и определения пиков импульсов, исключения наложений сигналов, вычисления скорости счёта и построения спектров сигналов [2].

После передачи на компьютер результаты могут быть использованы для вычисления итоговых, необходимых центральной системе управления параметров. В том случае, если требуется предоставление параметров в реальном времени, программное обеспечение должно разрабатываться с использованием специальных средств, например таких, как ITER Real Time Framework [3].

В случае, если задача может быть разделена на множество параллельных вычислений или оптимизирована для таких вычислений, существенный прирост производительности дости-



гается с помощью графических ускорителей (GPU). Существует множество различий в архитектуре и работе CPU и GPU компьютеров, таких как количество вычислительных ядер, их строение, способ доступа к памяти и другие. Программное обеспечение в таком случае так же должно разрабатываться с использованием специальных библиотек и средств, например, NVIDIA CUDA или OpenMP.

### **Заключение**

Задача потоковой обработки экспериментальных данных требует поддержки в виде сложных программно-аппаратных комплексов, требующих компетенций различных специалистов. Но в результате распространения таких систем появляется возможность построения систем управления и анализа со сложными обратными связями по множеству параметров, получаемых онлайн, а также возможность автоматизации обработки больших потоков данных научных экспериментов.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 11.05.2021 г. № Н.4а.241.19.21.1038 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2021 году».

### **Список литературы**

1. Plant Control Design Handbook – Iter. <https://www.iter.org/mach/codac/plantcontrolhandbook>.
2. M. Zhuravlev, G. Nemtcev. Development of a real-time signal processing unit for diamond detectors of ITER Vertical Neutron Camera. – EPJ Web Conf., 2021. – Vol. 253.
3. M. Kadziela, B. Jablonski. Evaluation of the ITER Real-Time Framework for Data Acquisition and Processing from Pulsed Gigasample Digitizers. – Journal of Fusion Energy (2020) 39:261–269.

## Применение методов компьютерного зрения и машинного обучения для обнаружения граф в электронной конструкторской документации

П.С. Ножнов<sup>2</sup>, к.т.н. О.В. Ульянин<sup>1,2</sup>, д.т.н. Е.М. Абакумов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ – Москва, Россия;

<sup>2</sup> ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова» – Москва, Россия

Рассмотрены современные средства и технологии распознавания изображений, в том числе с использованием машинного обучения. Описаны практические примеры, как использование данных технологий позволит автоматизировать некоторые этапы электронного документооборота.

## Using Computer Vision and Machine Learning for Detect Cells in Electronic Documents

P.S. Nozhnov<sup>2</sup>, PhD O.V. Ulyanin<sup>1,2</sup>, Dr. E.M. Abakumov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute) – Moscow, Russia;

<sup>2</sup> FSUE Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA) – Moscow, Russia

The paper reviews modern tools and technologies of image recognition, including those that use machine learning. Described practical examples of how using these technologies will allow computerize some stages of electronic document management.

### Введение

Информационные технологии (ИТ) настолько прочно закрепились в нашей повседневной жизни, что представить существование мира без них уже практически невозможно. И с каждым годом сфера ИТ развивается, появляются новые тренды и возможности. Аналитики компании Gartner, выступая на конференции Gartner IT Symposium/Xpo 2020, рассказали о стратегических трендах в ИТ-индустрии, на которые стоит обратить внимание в ближайшие 5–10 лет. Одним из этих трендов является развитие инжиниринга искусственного интеллекта (ИИ) [1].

Для большинства людей это до сих пор может казаться чем-то из будущего или научной фантастики, но это не так. Их собственные телефоны узнают их по лицу или по отпечатку пальца, а в СМИ периодически появляются новости о том, что уличная камера распознала в толпе преступника и помогла полиции задержать его. И это далеко не все примеры того, что ИИ не является чем-то из будущего – это уже настоящее.

Вышеописанные примеры демонстрируют работу технологии компьютерного зрения – области ИИ в сфере распознавания изображений. Данная технология предназначена для отслеживания, обнаружения, распознавания и классификации объектов. Входными данными для компьютерного зрения могут быть двумерные и трехмерные изображения, в том числе трехмерные сцены реального мира, а также видеоданные.

Программы компьютерного зрения включают в себя ряд методов обработки, таких как:

- счетчик пикселей;
- бинаризация (преобразование изображения в белые и черные пиксели);
- сегментация;
- оптическое распознавание символов;
- обнаружение краев;
- сопоставление шаблонов.

Их комбинируют в зависимости от поставленной задачи. Это позволяет решать задачи, которые классическими средствами решить невозможно [2].

### Применение технологии во ВНИИА

На данный момент технологии компьютерного зрения не применяются в информационных системах ВНИИА, однако задачи, полноценное решение которых невозможно другими методами, существуют. Они относятся к области автоматизации на этапе разработки и согласования конструкторской документации (КД). Одной из таких задач является автоматизация проставления атрибутов «Инвентарный номер», «ФИО принявшего, дата» и «Взамен инвентарного номера» в соответствующие поля электронной КД. Еще пару лет назад эти атрибуты проставлялись на распечатанном подлиннике вручную сотрудниками отдела технической документации. Сейчас данная задача частично автоматизирована – разработан и реализован класс, распознающий нужные поля в КД и проставляющий в них значения соответствующих атрибутов. В данном классе алгоритм распознавания нужных полей работает следующим образом:

- 1) определяет размер и координаты видимой части листа;
- 2) из начала координат видимой области «идёт» по диагонали и ищет черный пиксель;
- 3) если черный пиксель найден, проверяет – линия это или нет: на вертикальность (проверяет область слева, чтобы там не было черных пикселей) и длину (определяет верхнюю и нижнюю точку и считает длину);
- 4) если найденная линия в длину больше, чем  $2/3$  высоты видимой области, то по нижней точке определяется горизонталь по аналогичным правилам;
- 5) ищет 2 вертикали левее, 3 горизонтали и их длины, сравнивает длины с заданным диапазоном;
- 6) если все соответствует – рассчитывает центры полей и определяет необходимый размер шрифта;
- 7) если где-то есть несоответствие – переворачивает лист на 90 градусов и повторяет с шага 1.

Однако полностью избавиться от ручного труда не удалось – без использования искусственного интеллекта алгоритм работает только на идеально выполненных чертежах. На рис. 1 и 2 показаны примеры самых распространённых случаев, когда алгоритм не справляется со своей задачей.

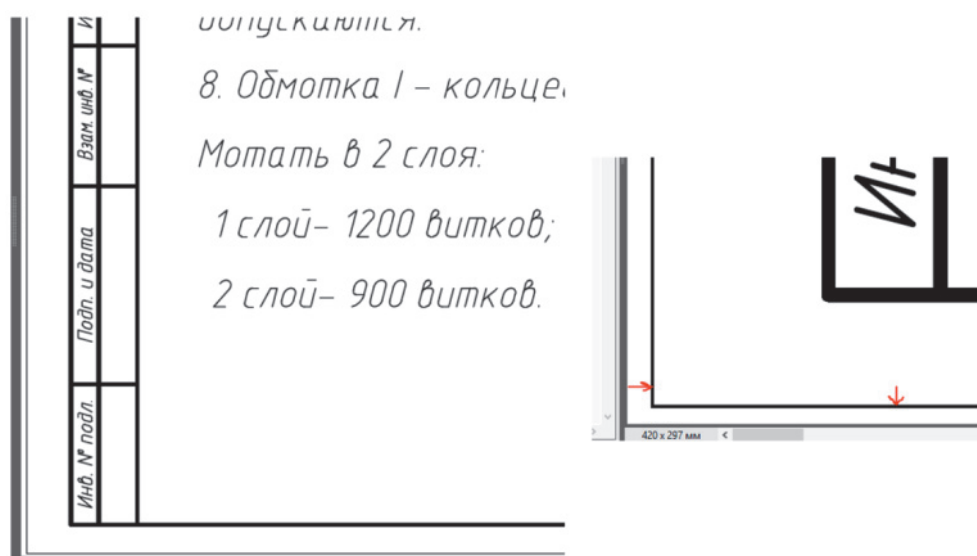


Рис. 1. Пример первого случая



Рис. 2. Пример второго случая

На рис. 1 приведен пример, когда дополнительная линия, которую добавляют к листу некоторые системы автоматизированного проектирования (САПР) при сохранении чертежа в формате PDF, мешает алгоритму найти нужную вертикаль. На втором рисунке – неровная форматка чертежа, которая видна лишь при значительном увеличении. Отсутствие соединения вертикали и горизонтали не дает найти центр поля, а неровная линия не проходит проверку на шаге 4. При этом человеческим глазом оба примера воспринимаются как корректные чертежи.

Из всего вышеописанного можно сделать вывод о том, что данный алгоритм не полностью решает задачу автоматизации проставления атрибутов «Инвентарный номер», «ФИО принявшего, дата» и «Взамен инвентарного номера» в соответствующие поля электронной КД и требует доработки.

Одним из вариантов решения проблемы является применение компьютерного зрения. Например, используя метод обнаружения краев, можно найти нужный прямоугольник, даже если он не дорисован, как во втором случае. При этом на пересечении прямых, обозначающих границу, мы сразу получаем координаты вершин углов нужного прямоугольника, которые, в свою очередь, помогут нам найти центр и правильно позиционировать текст, помещаемый в данное поле [3, 4]. Пример работы метода обнаружения краев показан на рис. 3.

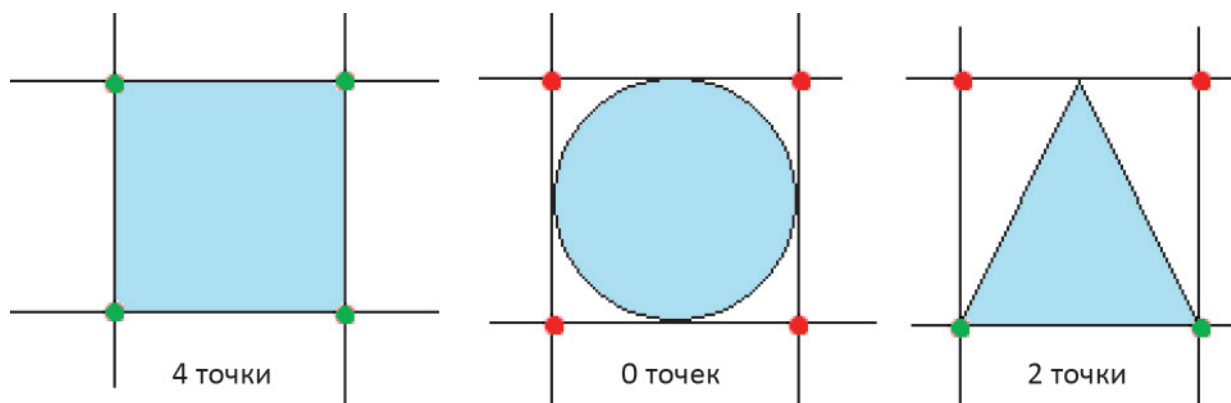


Рис. 3. Пример работы метода обнаружения краев для распознавания геометрии фигур

Тем не менее, алгоритм, используя метод обнаружения краев, будет находить все подходящие поля, как нужные, так и те, что расположены в основной надписи. Для сужения области поиска можно воспользоваться одним из самых популярных в области распознавания изображений технологий – распознавание по шаблону. Данная технология задействует машинное обучение и относится к группе обучаемых с учителем. Непосредственно учителем (образцом) выступает шаблон, а математически описать зависимости можно, используя граф, у которого вершины – линии, а ребра – пересечение линий, имеющие определенный вес, который учитывается при принятии решения. Визуальное отражение шаблона и графа зависимостей показано на рис. 4.

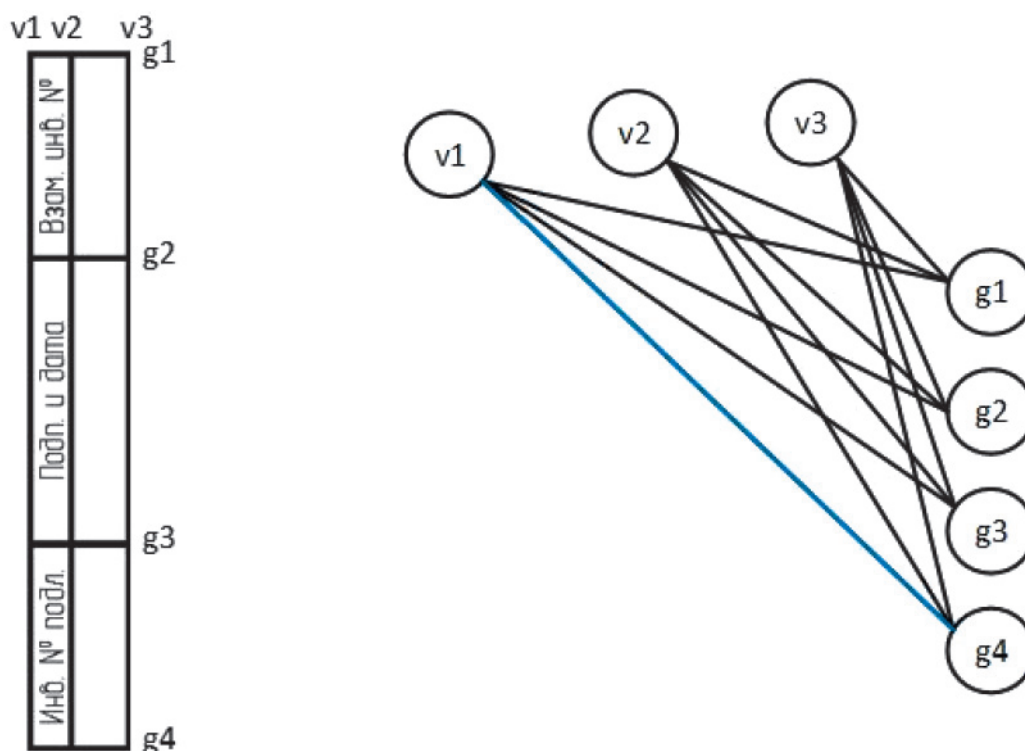


Рис. 4. Пример шаблона и граф зависимостей

В ходе обучения и работы алгоритма вес ребер будет пересчитываться, обеспечивая таким образом постоянный прирост в точности распознавания. Например, ребро  $v1g4$  выделено синим, так как его вес меньше остальных (на примере на рис. 2 видно, что нет пересечения линий), и отсутствие четкого пересечения не мешает распознаванию. Тем не менее, существуют также и ребра, вес которых должен оставаться неизменным (например,  $v2g2$ ), иначе алгоритм может начать находить несколько совпадений на чертеже и обучение придется проводить заново [5].

Дальнейшем развитием алгоритма можно охватить большее число задач. Например, автоматизация простановки фамилий согласующих в основную надпись КД (рис. 5). На данный момент в КД в формате PDF конструктору приходится заранее заполнять фамилии в основной надписи, еще до запуска запроса на продвижение или извещения об изменении. Это влечет за собой увеличение времени согласования документации, так как если указанного сотрудника нет на месте по разным причинам, то конструктору необходимо менять фамилию согласующего в КД или дожидаться возвращения первоначально указанного согласующего. Автоматизация простановки фамилий согласующих в основную надпись в перспективе могла бы существенно сократить время, необходимое на согласование КД.



1	Зам.	Т. 14536-2020	(подп.)	(дата)
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.			(подп.)	(дата)
Пров.			(подп.)	(дата)
Т. контр.			(подп.)	(дата)
Н. контр.			(подп.)	(дата)
Утв.			(подп.)	(дата)

Рис. 5. Поля основной надписи, заполнение которых необходимо автоматизировать

### Заключение

В ходе выполнения работы были рассмотрены примеры того, как использование современных информационных технологий позволит улучшить работу на этапе разработки КД, позволит сократить время, требуемое на разработку и согласование документации, и минимизировать количество ошибок, вызванных человеческим фактором. Также была выявлена необходимость в использовании современных систем компьютерного зрения для решения некоторых задач, связанных с автоматизацией на данном этапе жизненного цикла.

### Список литературы

1. Gartner IT Symposium/Хро. – [Электронный ресурс]. – <http://www.gartner.com/> (дата обращения – 10.02.2021).
2. И.А. Зиннатуллин, Д.С. Горяинов. Метод автоматизированного распознавания конструкторско-технологических элементов детали. – Самарский государственный технический университет, 2016.
3. Алгоритмы распознавания геометрических фигур. – [Электронный ресурс]. – <http://api-2d3d-cad.com/> (дата обращения: 12.02.2021).
4. Table detection, information extraction and structuring using deep learning – Nanonets. – [Электронный ресурс]. – <http://nanonets.com/> (дата обращения: 17.02.2021).
5. Abhilash Mane, Riddhi Adhikari, Shreyash Gadgil, Nilesh Raykar - Investigating Application of Machine Learning in Identification of Polygon Shapes for Recognition of Mechanical Engineering Drawings – 2019 International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE).

## **Система управления нагрева и охлаждения при проведении термической обработки дисков газотурбинных двигателей**

**П.Б. Римша**, к.т.н. А.О. Толоконский

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ – Москва, Россия

Доклад посвящён разработке программного обеспечения (ПО) системы управления по заданному режиму изменяемого термопрофиля. Приведены сведения о структуре системы, её организации, этапах разработки и отладки. Разработаны алгоритмы управления нагрева муфельной печи и установки охлаждения.

Разработанная программа позволяет провести закалку штамповки диска газотурбинного двигателя по заранее подобранному режиму и достигнуть требуемого уровня эксплуатационных характеристик.

## **Automatic Heating and Cooling System for Gas Turbine Engines Disks Heat Treatment**

**P.B. Rimsha**, PhD A.O. Tolokonskyi

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute) – Moscow, Russia

The report is devoted to the development of software (software) for a control system for a given regime of a variable thermal profile. Provides information about a special system, its group, development and debugging. Algorithms for controlling the heating of the muffle furnace and the cooling unit have been developed.

The developed program makes it possible to harden the die of a gas turbine engine disk in an accelerated mode and achieve the required level of operational properties).

Газотурбинные двигатели (ГТД) – довольно сложное устройство, преобразующее воздух и топливо в газоздушную смесь с большой энергией для создания крутящего момента и реактивной тяги (рис. 1). Детали ГТД испытывают высокие нагрузки, в том числе и температурные. Такие детали изготавливают из высокопрочных материалов, а детали, работающие при высоких температурах – класс жаропрочных никелевых сплавов. От работоспособности дисков турбин ГТД во многом зависят ресурс и технические характеристики двигателя (рис. 2). Важно при изготовлении полуфабрикатов дисков следовать требованиям технологического процесса изготовления, в том числе их термической обработке (ТО). Основными параметрами ТО являются температура ТО и скорость охлаждения полуфабрикатов. Следование процессу проведения ТО обеспечивает необходимую морфологию структуры и значительное повышение значений физико-механических свойств [3–5].

Автоматизация подобных технологических процессов – важная задача, решение которой мы опишем далее. Необходимо было снизить так называемый человеческий фактор при проведении ТО, следовательно, повысить прогнозируемость сформированной структуры материала полуфабриката.

Используя квазилинейные уравнения теплопроводности материала полуфабриката диска, зависящей от его температуры, учитывая, что штамповка имеет форму тела вращения, расчеты провели в цилиндрической системе координат.

$$c(\mathbf{x}, t, u) \frac{\partial u(\mathbf{x}, t)}{\partial t} = \operatorname{div}(k(\mathbf{x}, t, u) \nabla u(\mathbf{x}, t)) + f(\mathbf{x}, t, u), \quad t > t_0, \quad \mathbf{x} \in \Omega, \quad (1)$$

где  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  – координаты точки в пространстве  $\mathbb{R}^n$ ,  $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ ;  $u(\mathbf{x}, t)$  – температура в точке  $\mathbf{x}$  в момент времени  $t$ ;  $t_0$  – начальный момент времени;  $c(\mathbf{x}, t, u)$  – объемная теплоемкость;  $k(\mathbf{x}, t, u)$  – коэффициент внутренней теплопроводности;  $f(\mathbf{x}, t, u)$  – плотность тепловых источников (количество поглощаемого или выделяемого тепла в единицу времени в единице объема тела).

Из решения уравнения получаем расчетные формулы для узлов сетки на оси цилиндра:

$$G_{0k}^{n+1} = G^{-1}(G_{0k}^{n+1}), \quad k = \overline{1, M}. \quad (2)$$

На основе полученной математической модели проведения процесса термической обработки штамповки диска и рассчитанной разностной схемы составлен алгоритм работы системы.



Рис. 1. Схема ГТД [1]



Рис. 2. Диск ГТД с лопатками [2]

При проведении термической обработки полуфабрикатов очень важна точность поддержания температуры. Т.к. современные дисковые сплавы имеют сложный химический и фазовый состав, малейшее отклонение от необходимого значения температуры термической обработки может привести к тому, что не будет достигнута структура, обладающая высокими характеристиками. Погрешность по температуре не должна превышать  $\pm 2^\circ\text{C}$ . Для решения этой задачи используется муфельная высокотемпературная печь с фехрелевыми нагревателями.

Алгоритм работы системы был реализован на базе КТС МикКОН и ПО MWBridge (ядро реального времени для ОС Windows) с помощью встроенного алгоблочного языка [6–11].

Установка состоит из муфельной электропечи с двумя термopарами типа ТПП(S) для регулировки и контроля температуры с фехралевыми нагревателями, пирометра Тера-50, вентилятора охлаждения и частотного преобразователя Веспер Е2-8300.

Реализация разработанного алгоритма управления затруднена тем, что в конструкции установки охлаждения установлен редуктор, соединённый с электродвигателем, который даёт вращательное движение штамповки диска для равномерного охлаждения. Один оборот диск совершает за 1,5 с. Т.к. пирометр установлен стационарно, а штамповка вращается, пирометр будет принимать значения температуры из разных мест диска. Обод остывает быстрее, чем массивная ступица, в следствие чего температура на поверхности штамповки на ободу и ступице будет различная. Чтобы избавиться от скачков в показаниях и, следственно, в регулирующем сигнале, в расчет берут среднюю температуру диска за один оборот. Для этого используют фильтр, вычисляющий среднее показание из всех показаний, полученных за период 1,5 с. Вышеуказанный алгоблок реализован на основе алгоритма фильтра, скользящего среднего.

Для непосредственного взаимодействия оператора с системой при помощи ПО Display, входящего в ПТК УМИКОН, была разработана мнемосхема, представленная на рис. 3а. На экране мнемосхемы изображены массивы уставок для термостатирования и соответствующие им времена выдержки, полученные при помощи разностной схемы, указанной выше.

Через ПИД-регулятор контролера МВ-100 на практике была проведена отладка и работа программы через мнемосхему. На рис. 3б показан процесс отладки работы регулятора по уставке.

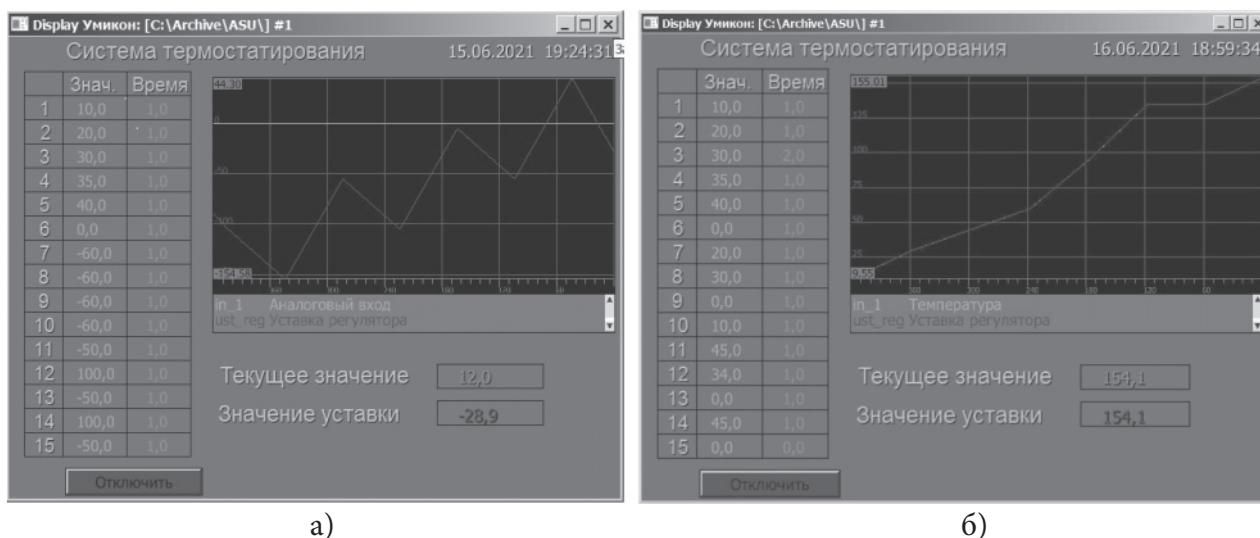


Рис. 3. Система термостатирования:  
 а) мнемосхема управления системой; б) отладка работы регулятора по уставке

Проведён процесс термической обработки штамповок в двух разных печах по двум вариантам управления муфельной печью. В первом варианте использовался дискретный выход управляющего сигнала, при помощи ШИМ через оптронную гальваническую развязку на тиристорный силовой блок. Во втором варианте был задействован аналоговый выход – на аналоговый вход тиристорного усилителя подавался управляющий сигнал 4–20 мА. При помощи созданной программы был задан необходимый режим термической обработки: загрузка в горячую печь при  $T1$ , подъем со скоростью  $V1$  до  $T2$ , выдержка  $t1$ , далее подъем со скоростью



$V2$  до  $T3$ , выдержка  $t2$  и выгрузка на воздух. Охлаждение контролировали регулятором МВ 100 при помощи пирометра Тера-0 через частотный преобразователь оборотами вентилятора охлаждения. Далее был проведён процесс закалки шлифов, вырезанных с кольца технологического припуска штамповки диска, в двух разных печах. Архивные диаграммы работы программ представлены на рис. 4.

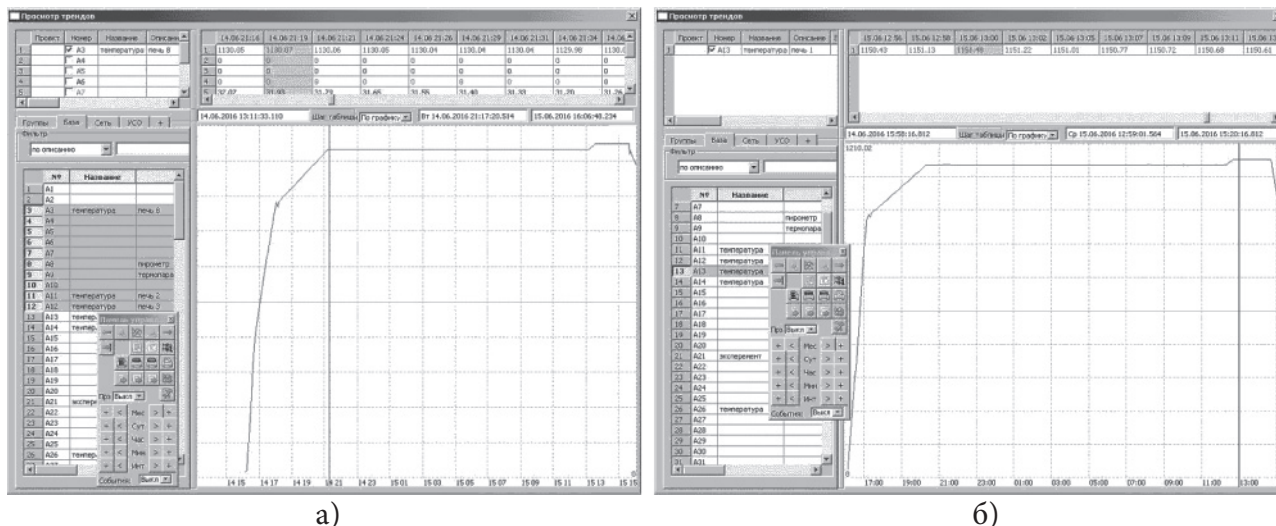


Рис. 4. График процесса термообработки на электропечи:

а) с аналоговым выходом управляющего сигнала; б) с дискретным управляющим ШИМ сигналом

По графикам видно, что процессы идентичны. Это подтверждается и микроструктурой шлифов, отрезанных от кольца технологического припуска штамповки, прошедших термическую обработку по одному режиму по двум вариантам управления печью. На рис. 5 показаны микроструктуры этих шлифов. Видно, что обе штамповки имеют структуру с размером зерна в диапазоне 100–150 мкм.

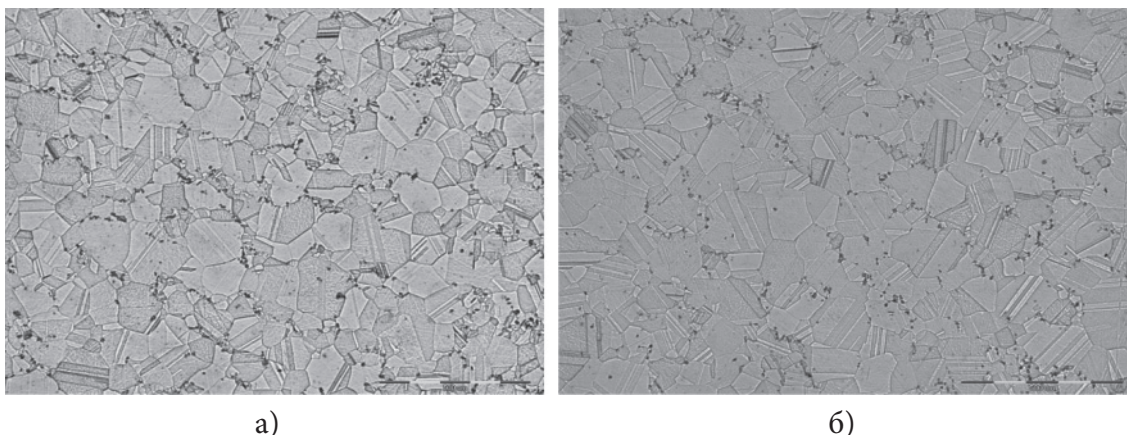


Рис. 5. Микроструктура шлифа, обработанного в электропечи:

а) с аналоговым выходом управляющего сигнала; б) с дискретным выходом управляющего сигнала

Таким образом, данную программу можно успешно использовать как с аналоговым, так и с дискретными выходами управляющих сигналов.



Подводя итоги работы, сделаем выводы:

1. Исходя из технических требований и анализа структуры аппаратных средств, для построения системы управления разработан алгоритм управления оборудованием, структура ПО системы управления и алгоритмы ПО;
2. Отработана технология проведения ТО и проведены испытания ПО на действующей установке. Разработанное ПО системы управления прошло успешные испытания на имитаторе.

Авторы выражают благодарность Шугаеву С.А. за помощь в анализе микроструктуры полуфабриката диска.

### Список литературы

1. <https://www.drom.ru/info/misc/42884.html>.
2. <https://lenta.ru/news/2020/01/10/engine/>
3. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» //Авиационные материалы и технологии. – 2015. – №1. – С. 3–33.
4. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Стратегические направления развития конструкционных материалов и технологий их переработки для авиационных двигателей настоящего и будущего //Автоматическая сварка. – 2013. – №10. – С. 23–32.
5. Чабина Е.Б., Ломберг Б.С., Филонова Е.В., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М. Изменение структурно-фазового состояния жаропрочного деформируемого никелевого сплава при легировании танталом и рением // Труды ВИАМ. – 2015. – №9. – Ст. 03 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 26.12.2021 г.).
6. Лебедев В.О. Руководство пользователя MWBridge MLB. 2020 г.
7. Лебедев В.О. Об оптимальной структуре комплекса технических средств АСУ ТП // Автоматизация в промышленности. – 2013. – №7. – С. 64–67.
8. Колодников И.А., Лебедев В.О. К вопросу об архитектуре современных АСУ ТП // Автоматизация в промышленности. – 2018. – №8. – С. 9–12.
9. Balakin B.V., Delov M.I., Kutsenko K.V., Lavrukhin A.A., Laouar S., Litvintsova Y.E., Marchenko A.S., Maslov Y.A., Analyzing temperature fluctuations to predict boiling regime, 2017, Thermal Science and Engineering Progress, 4, pp. 219–222.
10. Patel A.R., Ramaiya K.K., Bhatia C.V., Shah H.N., Bhavsar S.N. Artificial Intelligence: Prospect in Mechanical Engineering Field – A Review (2021) Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, 52, pp. 267–282.
11. Volodin V.S., Tolokonsky A.O., Implementation of the diversity principle of software and hardware complexes of process control systems for nuclear facilities in educational process // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy, Yadernaya Energetika, 2018. Vol. 2018, No.1, Q4 pp.154–164.

## Диагностика и отказоустойчивость бортовых вычислителей

к.т.н. **Н.В. Сильянов**

Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седарова» - Нижний Новгород, Россия

Рассматриваются вопросы обеспечения отказоустойчивости бортовых специализированных вычислителей с использованием различных форм избыточности. Приводятся способы решения задач технической диагностики в зависимости от этапа жизненного цикла вычислителя.

## On-board Computers Diagnostics and Fault Tolerance

PhD **N.V. Sil'yanov**

Branch of RFNC-VNIIEF "NIIS named after Yu.Ye. Sedakov" - Nizhny Novgorod, Russia

Problems of on-board specialized computers fault tolerance are considered regarding use of different redundancy forms. Different ways of technical diagnostics tasks solutions are shown according to stage of on-board computer life cycle.

В современных бортовых системах управления все более важная роль отводится специализированным вычислителям, правильность функционирования которых во многом определяет уровень техногенного риска, связанного с применением объекта управления. Источником риска является недостаточная надежность объектов и технических систем [1]. Факторами риска являются ошибки при проектировании, расчетах, изготовлении и монтаже объектов, неудовлетворительная оценка надежности на стадии эксплуатации, некачественное техническое обслуживание и ремонт, износ оборудования. Для снижения техногенных рисков бортовых вычислителей необходимо принимать меры по повышению их надежности, подтверждению исправности (отсутствия дефектов) на этапах разработки, отладки и изготовления, обеспечению отказоустойчивости на этапе эксплуатации.

Отказоустойчивость не исключает появления неисправностей, но их неблагоприятное воздействие предотвращается или минимизируется путем введения той или иной формы избыточности. Выделяют временную, информационную и структурную формы избыточности [2]. Часто отказоустойчивость обеспечивается некоторой комбинацией перечисленных форм избыточности.

Временная избыточность использует запас по времени, отведенного на решение задачи. Другими словами, введение временной избыточности связано с возможностью повторения вычислений при решении задач. Целью повторения выполнений программного модуля является обнаружение сбоев и маскирование их последствий. Повторение вычислений может осуществляться по одному и тому же алгоритму, однако для повышения достоверности решения задач программные модули могут выполняться по разным алгоритмам. Временной избыточностью можно считать мажоритарное голосование по результатам выполнения программных модулей. Также запас по времени необходим и в системах с откатом к контрольной точке вычислений при обнаружении сбоя. В системах с перезапуском по сторожевому таймеру тоже используется временная избыточность.

При использовании информационной формы избыточности обнаружение и коррекция сбоев осуществляются за счет применения кодов с исправлением ошибок или самокорректирующих кодов (биты паритета, контрольные суммы, коды Хэмминга, Рида-Соломона, БЧХ и др.) [3].

Одной из наиболее эффективных форм избыточности является структурная. Данная форма подразумевает применение того или иного вида резервирования. Например, широко распространена схема тройного резервирования с выбором правильной информации по принципу голосования «два из трех» (мажоритарная схема). Такие системы обладают статистической избыточностью, поскольку резервируемые элементы включены постоянно, действуют одновременно и при блокировании сбоя не происходит изменения структуры или режима функционирования. Помимо высокой надежности, такие структуры характеризуются высоким коэффициентом готовности системы [4].

Однако троированным системам с мажоритарией присущ ряд серьезных недостатков: значительные аппаратные затраты, сложность синхронизации каналов, большие габариты и масса, большое энергопотребление, большие затраты на средства контроля. Кроме того, такие структуры обладают малой гибкостью с точки зрения наращивания вычислительной мощности и модернизации отдельных модулей. Но основным недостатком является одновременное снижение надежности всех каналов в процессе длительного срока эксплуатации. Также следует отметить высокий риск отказа всей системы в случае одновременных отказов в каналах (или отказа устройства выборки) из-за воздействия различного рода неблагоприятных факторов.

Другим подходом обеспечения повышенной надежности и стойкости является динамическое резервирование (резервирование замещением, «холодный» резерв), при котором система оснащается специальным блоком, контролирующим работоспособность канала. В случае обнаружения отказа производится реконфигурация системы для подключения резервного канала.

Преимущества данного подхода обусловлены тем, что элементы характеризуются различными интенсивностями отказов во включенном и выключенном состоянии [5], а также тем, что в выключенном состоянии элементы менее подвержены воздействию неблагоприятных факторов, например, радиации [6]. При этом такие системы обладают меньшими габаритами, массой и энергопотреблением.

К недостаткам таких структур относят затраты времени на переключение между каналами, а также жесткие требования к надежности блока встроенного контроля. Так как блок встроенного контроля является последовательным звеном между работающим и резервным каналом, его надежность должна быть значительно выше надежности каждого из каналов, что практически сложно обеспечить при высокой достоверности переключения. При отказе блока встроенного контроля переключение с отказавшего канала на резервный канал не произойдет. Также следует отметить, что если блок управления и контроля допускает только одно переключение с отказавшего канала на резервный, то в условиях многократных сбоев произойдет нарушение работоспособности вычислителя.

В общем случае в [7] показано, что отказоустойчивость с минимально возможной избыточностью реализуема только в структурах, обладающих определенного рода математической симметрией. Структура вычислительной системы моделируется в виде графа, вершины которого соответствуют вычислительным модулям (процессорным узлам), а дуги – логическим (информационным) связям между ними. Данная модель предполагает, что отказам подвержены только вершины графа. Коммутационная сеть отказам не подвержена, т.е. при отказе модуля обработки можно осуществить реконфигурацию системы за счет перестройки связей и заменить отказавший модуль обработки на резервный. Замена отказавшего модуля на резервный в рамках применяемой модели означает переименование логических имен вершин графа таким образом, что избыточная вершина замещает отказавшую без изменения инцидентности между новыми логическими именами. Такое преобразование графа является инвариантным и также называется автоморфизмом. Совокупность автоморфизмов образует группу симметрии. Зная группу симметрии, которой обладает сис-

тема, можно составить таблицу групповых преобразований. При этом число преобразований равно порядку группы симметрии. Указанная таблица будет однозначно определять процесс реконфигурации после отказа.

В [8] алгоритмы обнаружения неисправностей являются частью методики реализации отказоустойчивости. Они должны обеспечивать выявление всех требуемых классов неисправностей, а также достаточную вероятность своевременного выявления. Первый шаг обеспечения отказоустойчивости – четкая идентификация представляющих интерес неисправностей. Первый этап обнаружения неисправностей – начальный контроль, осуществляемый перед нормальной эксплуатацией и служащий для выявления неисправных элементов аппаратуры, дефекты которых возникли в ходе производства или сборки.

Для исследуемых вычислительных устройств и систем проблемы подтверждения исправности или поиска дефекта на этапе проектирования выходят на новый виток. В качестве основных причин этого можно указать проблемы, характерные для современной электроники в целом [9, 10]:

- возрастание сложности схем, топологий, программного обеспечения плат и компонентов;
- необходимость программирования памяти перед тестированием;
- отсутствие доступа к выводам компонентов;
- отсутствие доступа к внутренним цепям платы;
- отсутствие адекватных диагностических моделей;
- нарушение правил контролепригодности (тестопригодности);
- входной контроль сложнофункциональных компонентов по внешнему виду.

Неотъемлемой частью практически любой современной вычислительной системы является программное обеспечение. К сожалению, даже полностью исправная аппаратура при этом не гарантирует правильное функционирование вычислительной системы. Надежность программ не может оцениваться так же, как и надежность аппаратуры. Определяющее влияние на надежность программ оказывают ошибки при постановке задач, ошибки алгоритмов и ошибки кодирования [11].

В соответствии с этим, сложность диагностирования программного обеспечения зачастую связана со следующими проблемами:

- недостаточная формализация требований;
- неверная интерпретация требований;
- неполный набор тестовых воздействий;
- ограниченное время проведения тестирования.

При решении проблем диагностирования вычислительных устройств и систем не просматривается единого подхода к аппаратной и программной части, поскольку дефекты и ошибки имеют разную природу, а также могут иметь различное влияние в зависимости от этапа жизненного цикла прибора. Конкретные этапы жизненного цикла имеют совершенно различные цели диагностирования, и это необходимо учитывать при разработке диагностического обеспечения вычислительных систем.

При разработке, отладке и изготовлении приборов необходимо быстро и точно осуществлять поиск неисправности в условиях ограниченного тестового доступа. Также для повышения различимости аппаратных и программных дефектов поиск неисправностей желательно производить до «прошивки» микросхем памяти. Для решения таких задач перспективным представляется использование установок автоматической оптической инспекции, рентгеновского контроля, тестирования с помощью «летающих» пробников, а также применение технологии граничного сканирования и различных встроенных схем самопроверки BIST (built-in-self-test).

При эксплуатации (особенно в неблагоприятных условиях) необходимо обеспечение отказоустойчивости за счет своевременного обнаружения неправильного функционирования и реконфигурирования системы. Для этого этапа нет необходимости достигать высокой глубины неисправностей. Дефекты могут парироваться различными способами, но до этого они должны быть как-то обнаружены. С наименьшими затратами это осуществляется внедрением алгоритмов самодиагностики. В случае обнаружения неисправности осуществляется перезапуск или (при наличии резерва) реконфигурирование, в том числе с возможностью восстановления результатов промежуточных вычислений.

Решение проблем тестирования программ в настоящее время сводится в основном к внедрению верификации и квалификационного тестирования на различных этапах проектирования программного обеспечения. Примером использования такого подхода может служить стандарт для встраиваемых систем [12].

### Список литературы

1. Н.Н. Чура. Техногенный риск / Под ред. В.А. Девисилова. – М.: КНОРУС, 2017.
2. B. Joshi, D. Pradhan, J. Stiffler. Fault-tolerant computing / Wiley Encyclopedia of Computer Science and Engineering, edited by B. Wah. – John Wiley and Sons, Inc., 2008. – p. 1128–1139.
3. У. Питерсон, Э. Уэлдон. Коды, исправляющие ошибки. – М.: Мир, 1976.
4. В.С. Харченко, Ю.Б. Юрченко. Анализ структур отказоустойчивых бортовых комплексов при использовании электронных компонентов industry // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2003. – №3. – С. 3–10.
5. Б. Диллон, Ч. Сингх. Инженерные методы обеспечения надежности систем. – М.: Мир, 1984.
6. О. Гобчанский, В. Попов, Ю. Николаев. Повышение радиационной стойкости промышленных средств автоматизации в составе бортовой аппаратуры // Современные технологии автоматизации. – 2001. – № 4. – С. 36–40.
7. М.Ф. Каравай. Применение теории симметрии к анализу и синтезу отказоустойчивых систем // Автоматика и телемеханика. – 1996. – №6. – С. 159–173.
8. А. Авиженис. Отказоустойчивость – свойство, обеспечивающее постоянную работоспособность цифровых систем // ТИИЭР. – 1978. – Т. 66. – №10. – С. 5–25.
9. А. Иванов. Инструменты для периферийного сканирования: тестирование плат и отладка функциональных узлов // Компоненты и технологии. – 2010. – №9. – С. 162–166.
10. А. Городецкий. Введение в технологии JTAG и DFT: Тестирование в технологиях граничного сканирования и тестопригодное проектирование. – Saarbrücken, Deutschland: Palmarium Academic Publishing, 2012.
11. В.В. Липаев. Надежность программных средств. – М.: Синтез, 1998.
12. ГОСТ Р 51904-2002. Программное обеспечение встроенных систем. Общие требования к разработке и документированию. – М.: Госстандарт России, 2002.



## **Разработка сервисного протокола RMAP-2.0 для процессорных модулей ТПТС**

**Ю.Н. Тихонов**

ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова» – Москва, Россия

В докладе описывается разработанный универсальный сетевой протокол RMAP-2.0, обеспечивающий возможность выполнения различных сервисных операций с процессорными модулями комплексов АСУ ТП ТПТС.

### **RMAP-2.0 Service Protocol for TPTS Processor Modules**

**Yu.N. Tikhonov**

FSUE Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA) – Moscow, Russia

A generic network protocol RMAP-2.0 is the object of this article. The developed protocol is used for TPTS processor modules support manning services.

Для эффективного обслуживания и сопровождения таких сложно-функциональных распределённых систем управления, каковыми являются программно-технические комплексы ТПТС, важно иметь набор сервисных средств, позволяющих выполнять ряд типовых сервисных операций с каждым из модулей программно-технического комплекса (ПТК) непосредственно на объекте эксплуатации.

Типовые сервисные операции условно можно разделить на основные и дополнительные. К основным операциям относятся процедуры по обновлению образов встроенного программного обеспечения (прошивок) процессорных модулей, а также процедуры по сбору предопределённого набора диагностических данных (логов) с процессорных модулей. Диагностическая информация позволяет заблаговременно выявлять проблемы в программных или аппаратных узлах комплекса.

К дополнительным сервисным операциям относятся действия по получению специфической информации, необходимость в которой оперативно определяется разработчиком в зависимости от конкретной ситуации. Такой информацией может являться, например, содержимое какой-то переменной в программе встроенного программного обеспечения (ВПО) модуля для исследования причин тех или иных отклонений в его работе.

Разработанный в рамках данной работы универсальный сетевой протокол RMAP (Remote Module Access Protocol) обеспечивает выполнение вышеперечисленных операций с процессорными модулями комплексов ТПТС-ЕМ, ТПТС-НТ и ТПТС-СБ без использования дополнительного специализированного оборудования. Операции осуществляются централизованно, с любого технологического персонального компьютера, работающего под управлением операционной системы (ОС) Windows или Linux, путём подключения его к информационной или технологической шине ПТК.

На рис. 1 показан пример подключения сервисного персонального компьютера (ПК) к модулям приборной стойки (ПС). Возможны варианты физического подключения через шины USB или Ethernet. Как правило, подключение осуществляется к шине Ethernet (EN/EN-2) комплекса, поскольку такая конфигурация обеспечивает централизованный RMAP доступ как ко всем модулям процессоров автоматизации (ПА), так и ко всем модулям станций ввода-вывода (СВВ) приборных стоек, составляющих ПТК.

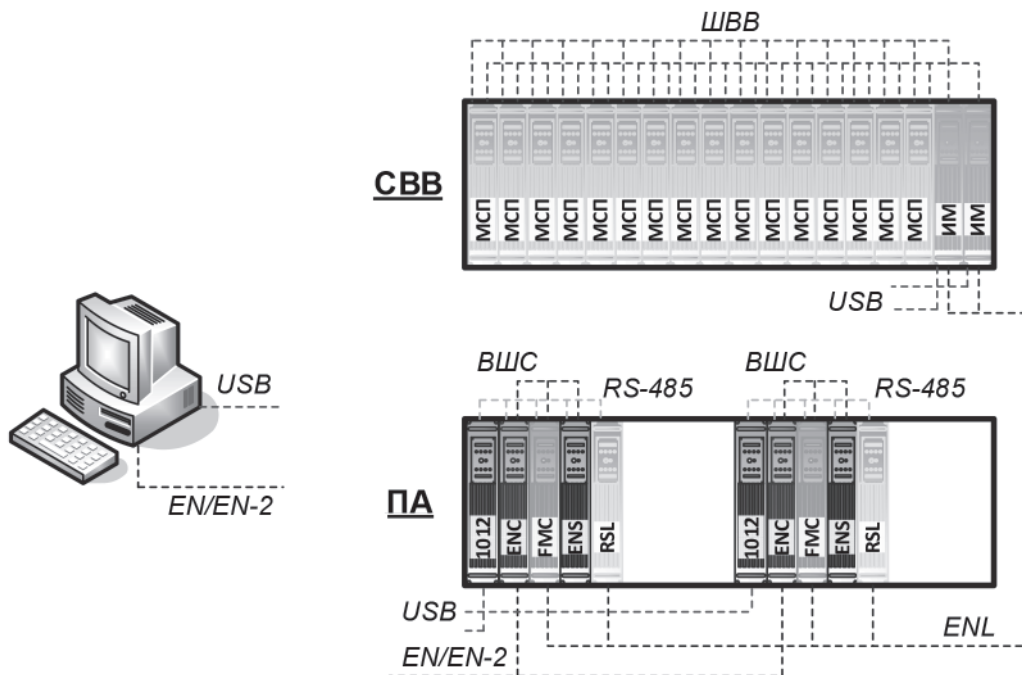


Рис. 1. RMAP подключение сервисного ПК к приборной стойке

Обслуживаемые процессорные модули образуют сеть RMAP. Для построения сети RMAP используются те же коммуникации, что и для информационного обмена в ПТК. При этом сервисные пересылки имеют пониженный приоритет для исключения их влияния на основные функции модулей, а также не влияют на выполнение функций безопасности.

Протокол RMAP использует специальные сервисные телеграммы, реализуя прикладной (Application Layer) и транспортный (Transport Layer) уровни модели OSI. На рис. 2 схематично показано взаимодействие различных уровней информационной модели при передаче одной прикладной телеграммы RMAP (aPDU).

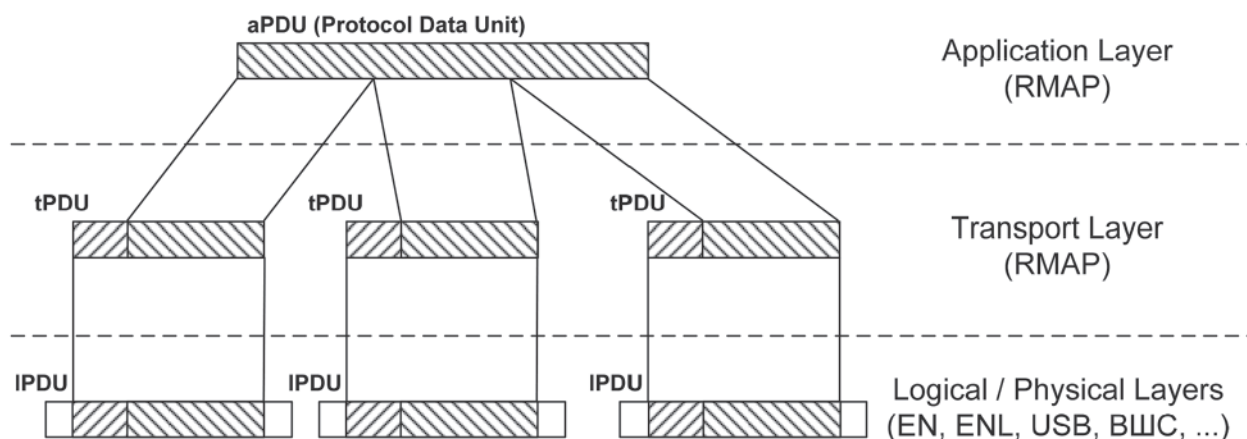


Рис. 2. Используемые в RMAP уровни OSI

Задача транспортного уровня (RMAP Transport Layer, RTL) – обеспечить независимость прикладного уровня RMAP от используемого при передаче логического или физического уровня. Транспортный уровень реализует сегментирование и конкатенацию телеграмм RMAP, размер которых превышает максимальный размер кадров при использовании того или иного логического или физического уровня.

Формат заголовков кадров транспортного уровня RMAP разработан по аналогии с [1] и представлен следующими типами кадров: SingleFrame – одиночный (несегментированный) кадр; FirstFrame/ConsecutiveFrame – первый/очередной кадр составного сообщения.

Транспортная сеть RMAP представляет собой логическое объединение следующих шин ТПТС: межстоечных (EN, EN-2), внутристойных (ENL, V24), внутрикрейтовых (ВШС, ШВВ, USB UART) и внутримодульных (CPU-MCU UART).

На уровне процессорных модулей, реализуемые модулем шины RMAP можно условно разделить на следующие две группы:

- Н-шины (Host): одна или более шин, по которым в модуль поступают запросные телеграммы RMAP (как правило, инициированные сервисной программой на ПК);
- Т-шины (Target): ноль или более шин, по которым в модуль поступают ответные телеграммы RMAP (от других модулей сети RMAP).

Сервисная программа на ПК подключается к Н-шине какого-либо модуля ПТК и получает RMAP доступ как к самому модулю, так и ко всей иерархии модулей на его Т-шинах. Поступающие в модуль телеграммы RMAP, в зависимости от адреса и типа, могут либо обрабатываться самим модулем, либо транслироваться в следующий модуль по Т- или Н-шине.

Поскольку RMAP подразумевает возможность одновременного обмена только с одним Host-устройством, в каждом процессорном модуле в каждый отдельный момент времени имеется только одна активная Н-шина. Активной назначается Н-шина, из которой в последний раз была получена телеграмма с запросом RMAP. Ответные телеграммы RMAP от модуля, а также телеграммы, поступающие из его Т-шин, направляются в активную Н-шину.

Абоненты сети RMAP имеют уникальные адреса. Адрес назначается модулем, к Т-шине которого подключен данный абонент RMAP, согласно фиксированной таблице соответствия логических и физических адресов.

На прикладном уровне протокол RMAP реализует группы телеграмм FIRMWARE, MEMORY, TEST, SYSTEM, LOG, LCORE, DIAG и DATA, обеспечивая выполнение следующих сервисных действий с модулями:

- запись/чтение/удаление исполняемых образов ВПО;
- чтение памяти и периферийных регистров;
- чтение/стирание журнала событий из энергонезависимой памяти;
- получение диагностической информации из оперативной памяти;
- получение данных трассировки и профилирования ВПО;
- проверку шин и идентификацию модулей;
- работу (чтение/запись) с настройками в энергонезависимой памяти.

Например, группа телеграмм FIRMWARE позволяет осуществлять работу (удаление, запись, считывание) с образами исполняемого программного обеспечения процессорных модулей. А группа телеграмм MEMORY предназначена для работы с различными типами памяти процессорных модулей. Один из вариантов использования этих телеграмм: диагностика и отладка программного обеспечения при отсутствии возможности локального подключения к процессорному модулю через JTAG.

Группа телеграмм SYSTEM предназначена для исследования сети абонентов RMAP и организации доступа к модулям, которые недоступны по шине, непосредственно подключенной к сервисному ПК. Для минимизации времени поиска абонентов – в версии протокола RMAP-2.0 в группу SYSTEM введены телеграммы, обеспечивающие мгновенный доступ к информации по Т-шинам каждого модуля. Для поддержания этой информации в актуальном состоянии каждый модуль выполняет ряд действий по событиям, которые могут изменять набор и состав

прошивок каждого модуля на своих Т-шинах (удаление/запись, потеря связи, смена мастерства в резервированной системе и т.п.).

Основным программным средством RMAP для ПК является программа NT Programmer, реализующая работу практически со всеми вышеперечисленными группами телеграмм. На рис. 3 показан внешний вид основных интерфейсных окон программы NT Programmer, имеющей в данном примере адрес 763 на шине EN и отображающей полученную информацию о типах, версиях прошивок и серийных номерах процессорных модулей стойки ТПТС-НТ с адресом ПА 307 на шине EN.

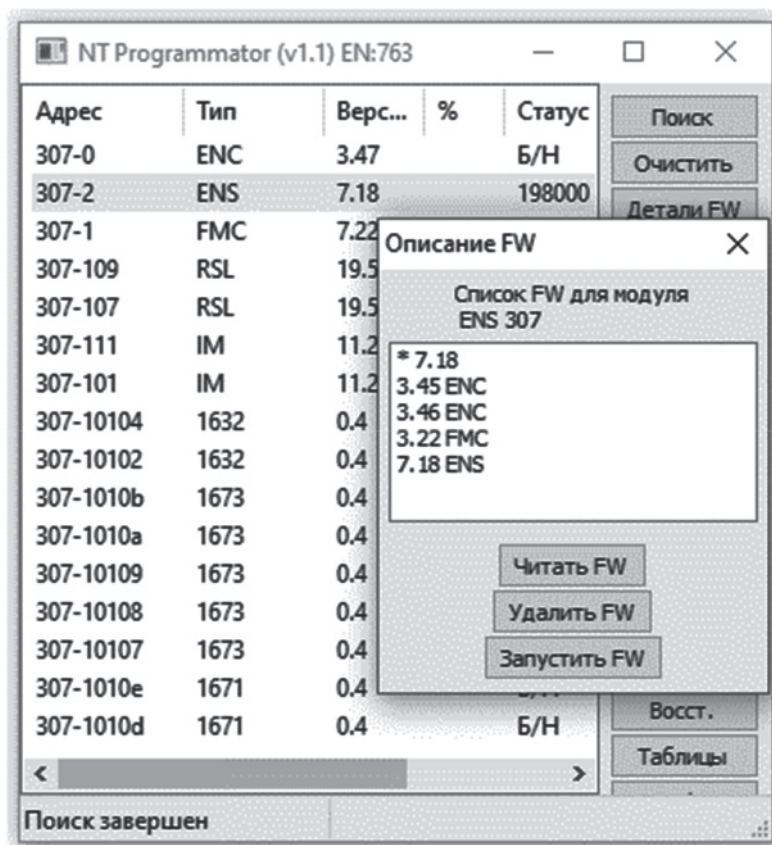


Рис. 3. Работа с образцами ВПО в NT Programmer

Протокол RMAP, изначально разработанный для обновления прошивок процессорных модулей комплекса ТПТС-НТ, впоследствии был распространён на модули комплексов ТПТС-СБ и ТПТС-ЕМ. Протокол развивается, по мере необходимости дополняясь новыми телеграммами и новым функционалом, обеспечивающим более удобную и эффективную работу с сервисными функциями модулей.

В настоящее время протокол RMAP с разной полнотой функциональности реализован в поставочных версиях ВПО всех процессорных модулей комплексов ТПТС-ЕМ, ТПТС-НТ и ТПТС-СБ.

### Список литературы

1. ISO 15765-2 “Diagnostics on Controller Area Network (CAN). Part 2: Network Layer Services”, 2004.



Секция

---

« Киберфизическое, электрофизическое и ядерное приборостроение »

Председатель секции  
**Юрков Дмитрий Игоревич**,  
кандидат технических наук,  
заведующий кафедрой №24 НИЯУ МИФИ,  
заместитель директора -  
первый заместитель главного конструктора -  
начальник научно-производственного центра  
импульсной техники ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»



## Элементный анализ фосфорных руд методом меченых нейтронов

к.ф.-м.н. В.Ю. Алексахин<sup>1,2</sup>, **А.И. Ахунова**<sup>1</sup>, Е.А. Разинков<sup>1</sup>, Ю.Н. Рогов<sup>1,2</sup>,  
д.ф.-м.н. М.Г. Сапожников<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> ООО «Диамант» – Дубна, Россия;

<sup>2</sup> Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ) – Дубна, Россия

Обсуждаются результаты применения конвейерного анализатора АГП-К для элементного анализа фосфорных руд методом меченых нейтронов. Метод меченых нейтронов позволяет дистанционным образом, без отбора пробы, определять концентрации элементов, усредненные по значительному объему вещества. Толщина слоя материала на конвейере может достигать 300 мм. Анализатор предоставляет данные об элементном составе руды в режиме реального времени.

## Elemental Analysis of Phosphorus Ores by the Tagged Neutron Method

PhD V.Yu. Alexakhin<sup>1,2</sup>, **A.I. Akhunova**<sup>1</sup>, E.A. Razinkov<sup>1</sup>, Yu.N. Rogov<sup>1,2</sup>,  
Dr. M.G. Sapozhnikov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> LCC «Diamant» – Dubna, Russia;

<sup>2</sup> Joint Institute for Nuclear Research (JINR) – Dubna, Russia

The results of application of the AGP-K conveyor analyzer for elemental analysis of phosphorus ores by tagged neutrons method are discussed. The tagged neutron method makes it possible to remotely, without sampling, evaluate the concentrations of elements averaged over a significant volume of matter. The thickness of the material layer on the conveyor can be up to 300 mm. The analyzer provides data on the elemental composition of the ore in online mode.

Для многих горно-обогатительных производств важно знать элементные концентрации состава руды, движущейся по конвейеру. Обычно для этого отбираются пробы руды, которые затем анализируются химическими методами. Однако это довольно трудозатратный и долгий путь, позволяющий получать данные о составе руды каждые два часа или более. В данной работе обсуждаются результаты применения конвейерного анализатора АГП-К-2, разработанного компанией «Диамант», который предоставляет данные об элементном составе руды на конвейере каждые 40–60 сек.

Анализатор работает на основе метода меченых нейтронов [1–3], который дает возможность выполнять неразрушающий элементный анализ вещества на расстоянии. Он состоит в облучении объекта анализа пучками быстрых нейтронов с энергией 14,1 МэВ, которые образуются в реакции  $d + {}^3\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + n$ .

В этой реакции нейтрон и  $\alpha$ -частица разлетаются практически в противоположные стороны (см. рис. 1). Поэтому, регистрируя  $\alpha$ -частицу, сопутствующую нейтрону, можно определить направление вылета нейтрона. Такая процедура называется мечением нейтронов.

Быстрый нейтрон с энергией 14,1 МэВ попадает в вещество исследуемого объекта и взаимодействует с ядрами вещества в реакциях неупругого рассеяния ( $n, n'\gamma$ ). Поскольку каждый химический элемент имеет свой характерный  $\gamma$ -спектр, то можно провести элементный анализ исследуемого объекта.

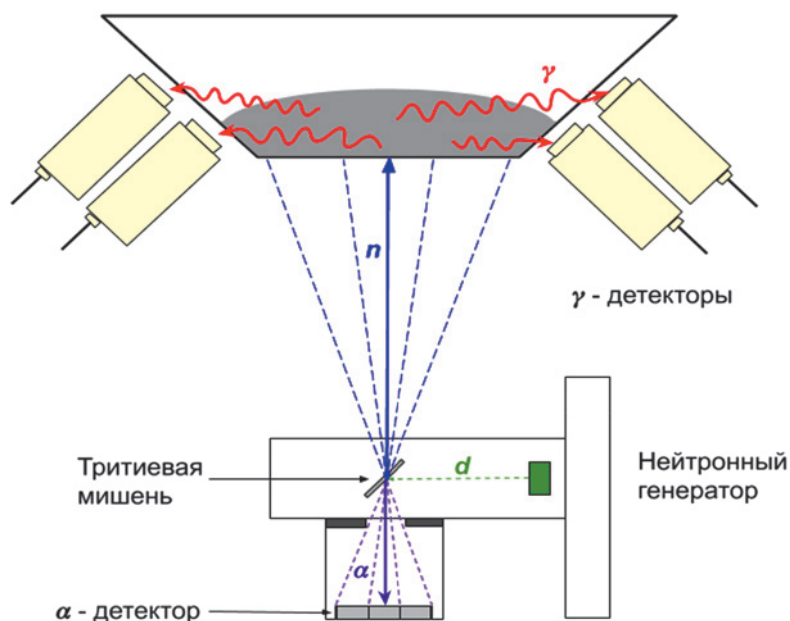


Рис. 1. Схема метода меченых нейтронов

На рис. 2 показан получаемый энергетический спектр гамма-квантов от апатитовой руды. Разными линиями показаны вклады от энергетических спектров отдельных элементов. Сплошной жирной линией показан полный вклад от всех элементов, а все остальные линии – это вклады отдельных элементов, например, пунктирной линией показан вклад кислорода.

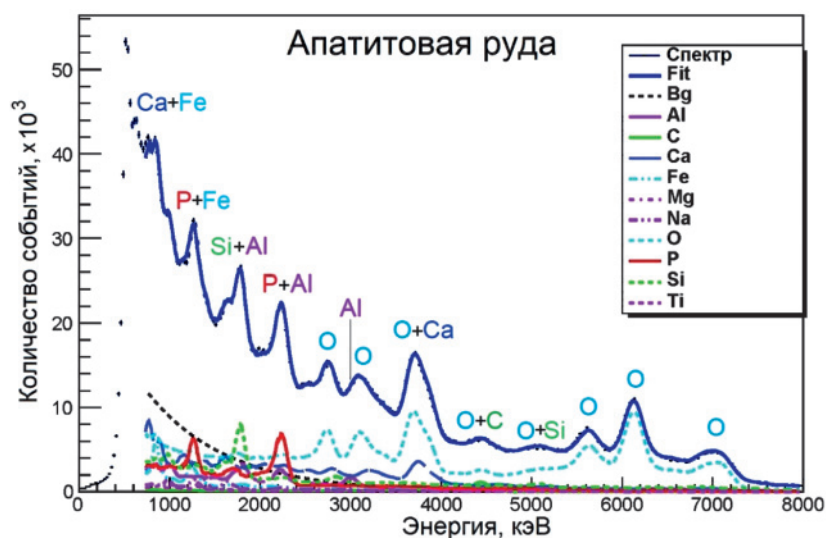


Рис. 2. Типичный энергетический спектр гамма-квантов образца апатитовой руды

Регистрация гамма-излучения в совпадениях с сигналом от  $\alpha$ -частицы позволяет в 200 раз уменьшить влияние фона [1–3].

Нейтронный модуль конвейерного анализатора АГП-К-2 размещается под рабочей лентой конвейера (рис. 3). Облучение материала на конвейере происходит потоком быстрых меченых нейтронов с энергией 14 МэВ от портативного нейтронного генератора ИНГ-27 производства ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова». Гамма-кванты от реакций неупругого рассеяния регистрируются системой 14 сцинтилляционных детекторов на основе кристалла ВGO. Анализатор также включает в себя системы питания, системы сбора данных и биологической защиты. Данные передаются в шкаф местного управления, а затем обрабатываются на компьютере оператора.

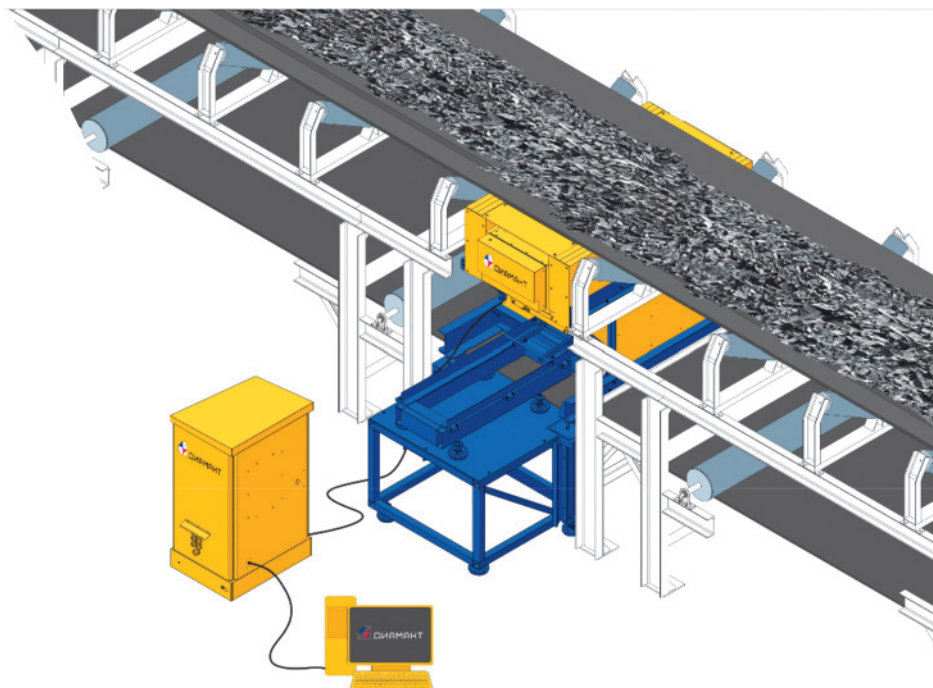


Рис. 3. Общая схема конвейерного анализатора АГП-К

Анализ потока руды производится на всю глубину слоя руды до 300 мм. Измеряются концентрации Al, Ca, C, Fe, Mg, Na, O, P, Si, Ti, которые затем пересчитываются на соответствующие оксиды.

На рис. 4 показано окно интерфейса анализатора, в котором отслеживается изменение элементных концентраций со временем. Каждая точка на графике появляется через 30–40 сек.

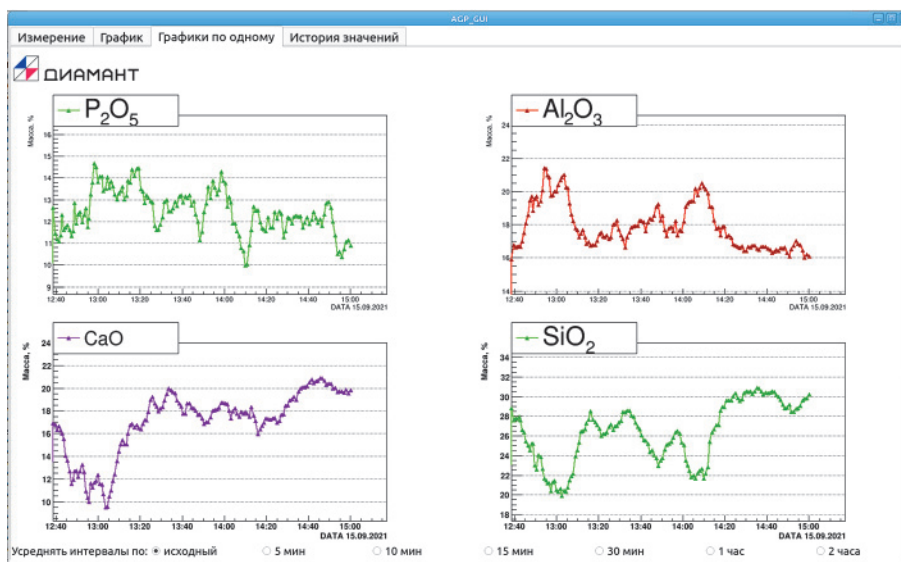


Рис. 4. Изменение элементных концентраций в течение дня

В ходе испытаний конвейерного анализатора АГП-К-2 было получено хорошее согласие данных автоматизированной системы аналитического контроля (АСАК), используемой на предприятии, и АГП-К-2, усредненных по всему периоду испытаний в 5 часов. Так, среднее значение концентрации  $P_2O_5$  по АСАК составило 11,48%, а по данным АГП-К – 11,20%. На рис. 5 приведены результаты сравнения данных АСАК и АГП-К по элементной концентрации  $P_2O_5$ .

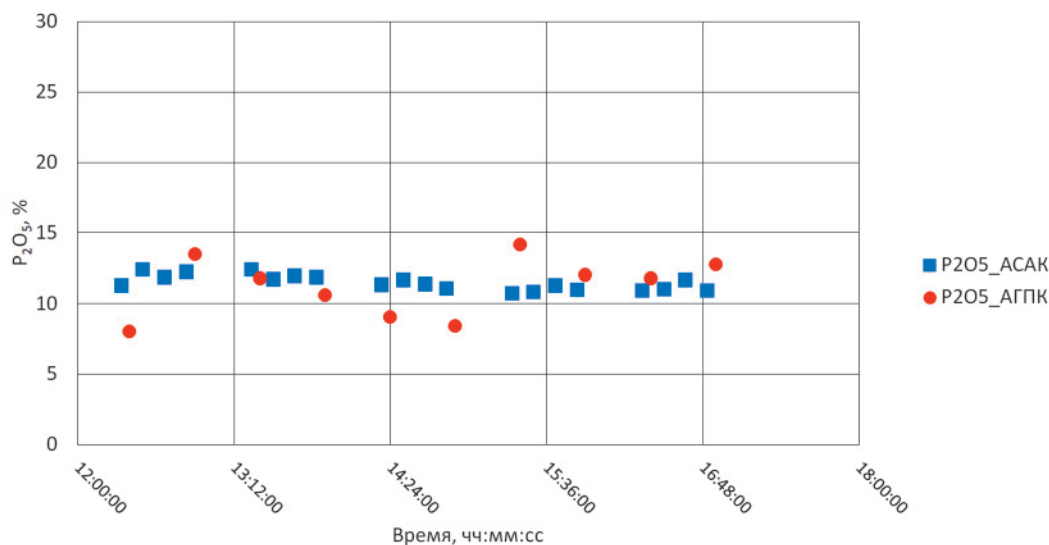


Рис. 5. Сравнение данных АСАК и АГПК-К

Работа анализатора в течение опытно-промышленной эксплуатации (3 месяца) показала стабильную работу всех систем установки. На рис. 6 приведена зависимость энергетического и временного разрешения системы гамма-детекторов от времени в течение 3 месяцев.

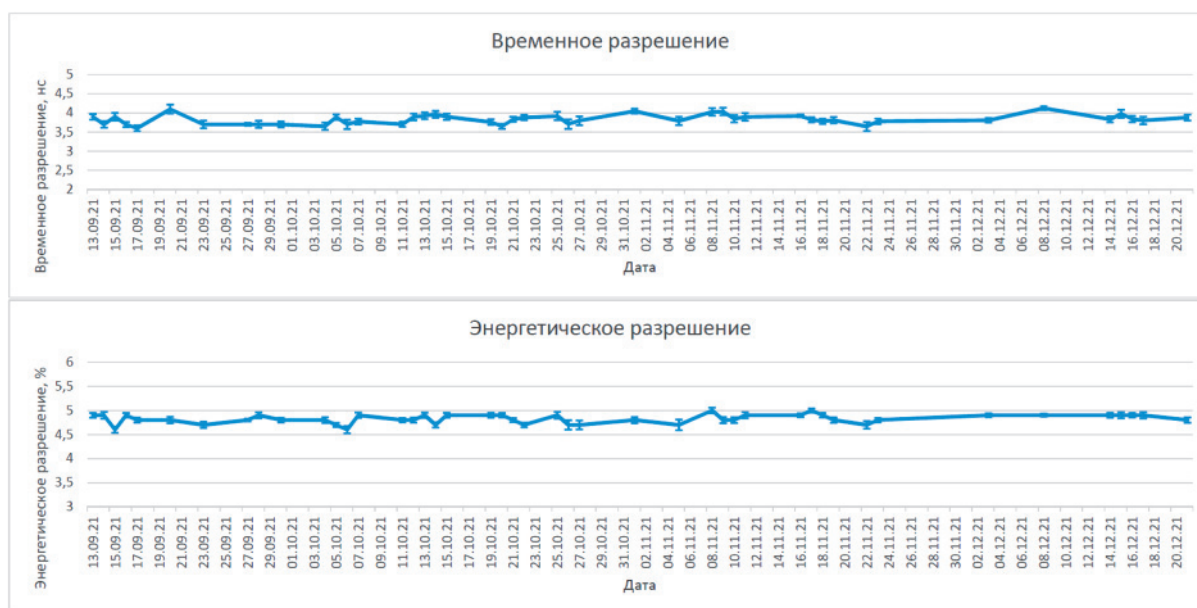


Рис. 6. Зависимость от времени временного и энергетического разрешения системы гамма-детекторов

Анализ работы АГПК-2 показывает хорошую сходимость данных АГПК-2 с результатами лабораторных измерений, стабильность работы установки и перспективность применения данного анализатора для определения элементных концентраций фосфорных руд в режиме реального времени.

### Список литературы

1. V. Valkovic, 14 MeV Neutrons: Physics and Applications // ISBN-13: 978-1482238006.
2. Alexakhin V.Y. et al., Detection of Diamonds in Kimberlite by the Tagged Neutron Method. Nuclear Instruments and Methods A785 (2015) 9.
3. V.M. Bystritsky et al., Physics of Particles and Nuclei Letters, 2008, Volume 5, p. 441.

## Изменение структурно-фазового состояния поверхностного слоя хромистой стали под действием потоков плазмы

к.ф.-м.н. **Н.В. Бойко**<sup>1</sup>, к.ф.-м.н. С.В. Колесников<sup>1</sup>, С.Г. Рудаков<sup>1</sup>,  
д.т.н. Б.Д. Лемешко<sup>1,2</sup>, к.т.н. Ю.В. Михайлов<sup>2</sup>, И.А. Прокуратов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ – Москва, Россия;

<sup>2</sup> ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова» – Москва, Россия

Методами рентгеноструктурного и рентгеноспектрального анализа, оптической и электронной микроскопии, термоанализа и мессбауэровской спектроскопии проведены исследования образцов ферритной 12% хромистой стали, подвергнутых воздействию плазменных струй в камере плазменного фокуса ПФ5-40 на установке ИНГ-103, которые показали возникновение и фиксацию структурно-фазовых изменений в поверхностном слое.

## Structural-phase Changes of the Surface Layer of Chromium Steel Under the Plasma Jets

PhD **N.V. Boiko**<sup>1</sup>, PhD S.V. Kolesnikov<sup>1</sup>, S.G. Rudakov<sup>1</sup>,  
Dr. B.D. Lemeshko<sup>1,2</sup>, PhD Yu.V. Mikhailov<sup>2</sup>, I.A. Prokuratov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute) – Moscow, Russia;

<sup>2</sup> FSUE Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA) – Moscow, Russia

The methods of X-ray diffraction and X-ray spectral analysis, optical and electron microscopy, thermal analysis and Mössbauer spectroscopy were used to study samples of ferritic 12% chromium steel exposed to plasma jets in the plasma focus device, which showed the occurrence and fixation of structural-phase changes in the surface layer.

Среди нетрадиционных методов обработки металлических материалов для целенаправленного изменения их структурно-фазового состояния и физико-механических свойств весьма эффективным является воздействие потоков высокотемпературной газовой плазмы в установках типа «плазменный фокус» (ПФ). ПФ сочетает в себе возможности одновременного теплового, химического и механического воздействия на поверхность материалов, приводящего к изменению его состава, структуры и свойств [1–4].

При оптимальном выборе режима облучения можно получать поверхностный слой (ПС) с модифицированным структурно-фазовым состоянием, в том числе и неравновесным, имеющим, как правило, улучшенные физико-механические и физико-химические свойства.

Данная работа направлена на изучение воздействия мощных импульсных ионно-плазменных потоков на образцы ферритно-мартенситной стали и установление взаимосвязи изменения структурно-фазового состояния их поверхностного слоя с режимами воздействия в камере плазменного фокуса ПФ5-40 на установке ИНГ-103.

В качестве исходного исследуемого материала выбрана сталь типа ЭК-181 (RUSFER-EK-181), являющаяся перспективной для использования в качестве конструкционных и функциональных



элементов рабочих камер плазменных установок и термоядерных реакторов с инерциальным и магнитным удержанием плазмы, предполагающих экстремальные условия эксплуатации.

Образцы представляли собой пластины  $15 \times 15 \times 1$  мм. Основная фаза исходного образца – феррит. Образцы подвергались (ФГУП «ВНИИА») последовательному воздействию струи дейтериевой плазмы с разным количеством (1, 5 и 15) срабатываний установки «плазменного фокуса» (14 мкФ,  $10 \div 23$  кВ,  $150 \div 350$  кА,  $4,6 \div 5,2$  мкс).

Согласно данным оптической микроскопии, воздействие плазменной струей привело к существенному изменению поверхности облученных образцов, связанному с процессами плавления, испарения, распыления и сверхбыстрого охлаждения. Поверхность имеет волнообразный рельеф и содержит различные дефекты – гребни, наплывы, капли, поры, микротрещины. Характер повреждений зависит от близости к центру воздействия.

Проведены измерения на рентгеновском дифрактометре ДИФРЕЙ образцов стали в исходном состоянии (рис. 1а) и после облучения (рис. 1б) с максимальным количеством воздействий плазменной струей (15 срабатываний). Обнаружены отличия в рентгенограммах поверхности исследованной стали до и после воздействия плазменным фокусом. В исходном образце наблюдается одна фаза, идентифицированная как ОЦК-железо (альфа-фаза) (рис. 1а). После облучения с максимальным количеством воздействий плазменной струей на рентгенограмме (рис. 1б) обнаруживаются три дополнительных малоинтенсивных пика, связанных с появлением новой фазы, идентифицированной как ГЦК-железо (аустенит, гамма-фаза).

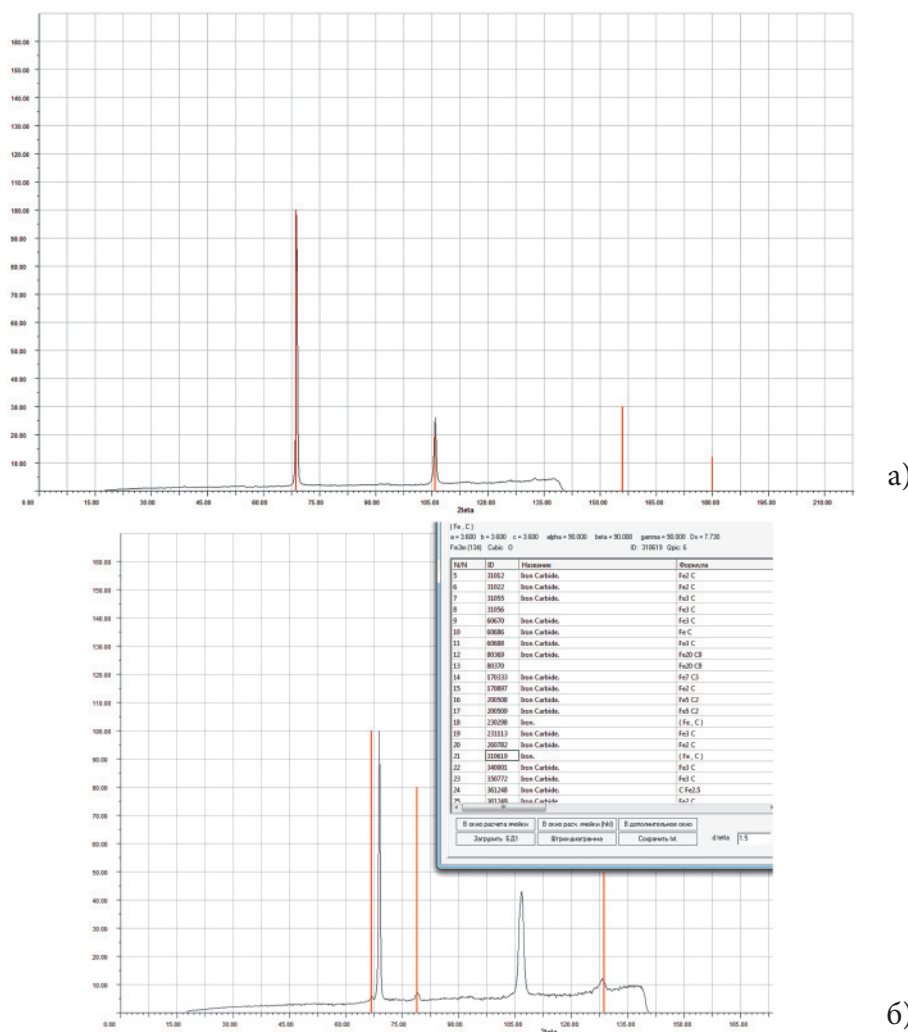


Рис. 1. Рентгенограмма образца стали в исходном состоянии (а) и после 15 срабатываний (б)

Интенсивность появившейся линии в  $\sim 10^2$  меньше интенсивности линии ОЦК-железа.

В геометрии «на пропускание» сняты мессбауэровские спектры (рис. 2) исходного образца стали типа ЭК-181 в виде фольги толщиной 100 мкм и образца, подвергнутого с двух сторон воздействию плазменной струи (8+5 воздействий). В качестве источника гамма-излучения использовался  $^{57}\text{Co}(\text{Rh})$ .

Спектр исходного образца стали представляет собой суперпозицию секстетов линий с разными значениями эффективных магнитных полей (ферромагнитные железосодержащие фазы) и дублета линий (парамагнитная фаза железа).

Спектр образца, подвергнутого воздействию плазменной струи, аналогичен исходному, но имеет дополнительно определяемую линию – синглет, имеющий мессбауэровские параметры гамма-фазы железа. Таким образом, воздействие плазменной струи на образец стали, представляющий собой ферритную фазу альфа-железа, привело к возникновению и стабилизации после охлаждения до комнатной температуры в поверхностном слое высокотемпературной гамма-фазы железа. Нагревание образца, подвергнутого воздействию потоков дейтериевой плазмы, до  $635\text{ }^\circ\text{C}$  приводит к исчезновению в его спектре мессбауэровской линии гамма-железа, что может быть связано с перераспределением углерода по объему.

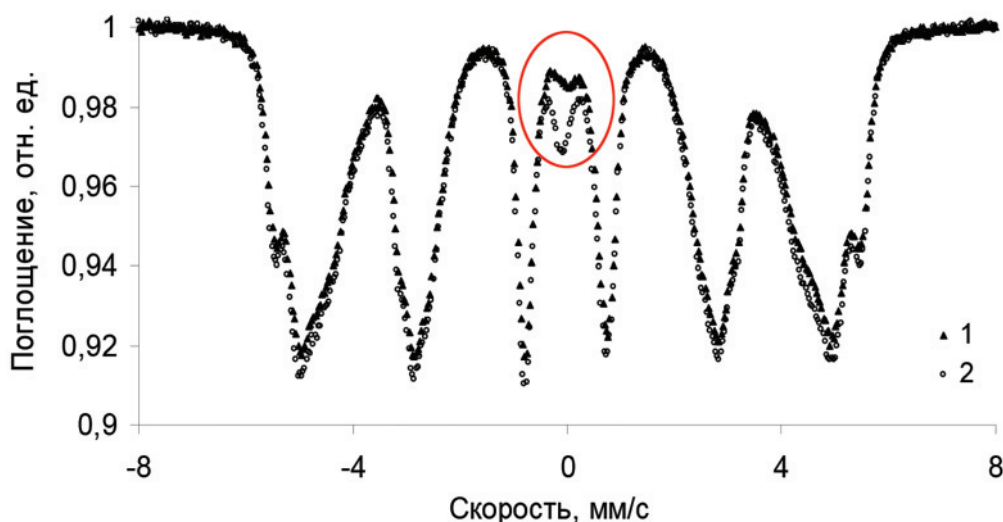


Рис. 2. Сравнение мессбауэровских спектров стали: исходный образец (1) и образец после воздействия плазменной струи (2)

Проведены измерения на синхронном термоанализаторе SDT\_Q600 образцов стали ЭК-181 в исходном состоянии и после плазменного воздействия с пятью и пятнадцатью срабатываниями.

Критические точки фазовых превращений определялись в режиме непрерывного нагревания от комнатной температуры до  $T = 1100\text{ }^\circ\text{C}$  со скоростью  $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$  на воздухе и в аргоне. Полученные ТГ- и ДСК-кривые приведены на рис. 3. Значительные изменения веса образцов наблюдаются после достижения температуры  $T \approx 900\text{ }^\circ\text{C}$  и связаны с окислением стали на воздухе.

На кривых теплового потока образцов стали при нагревании на воздухе до  $T = 1100\text{ }^\circ\text{C}$  наблюдаются три температурных интервала локальных экстремумов, соответствующих фазовым превращениям. Два эндотермических пика соответствуют магнитному фазовому переходу из ферромагнитного в парамагнитное состояние при температуре Кюри ( $T \approx 727 \div 729\text{ }^\circ\text{C}$ ) и  $\alpha \rightarrow \gamma$  превращению ( $T \approx 861 \div 866\text{ }^\circ\text{C}$ ) [5], а экзотермический пик сопровождает процесс окисления ( $T \approx 990 \div 1030\text{ }^\circ\text{C}$ ). При нагревании в аргоне экзотермический пик при  $T \approx 1000\text{ }^\circ\text{C}$  отсутствует.

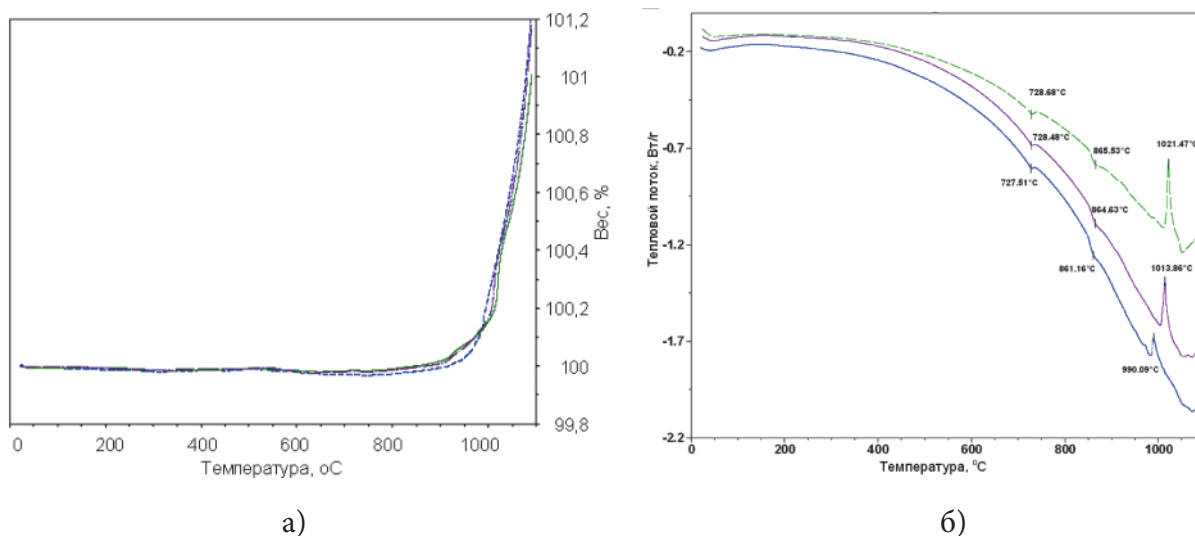


Рис. 3. ТГ- и ДСК-кривые образцов стали в исходном состоянии (—) и после 5 (---) и 15 (····) воздействий плазменной струей

Методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с применением рентгеноспектрального анализа получены изображения образцов с 1, 5 и 15 воздействиями импульсов дейтериевой плазмы в обратно рассеянных и вторичных электронах, проведено картирование образца с максимальным воздействием по элементам в области, примыкающей к границе между модифицированным поверхностным слоем и остальной частью пластины, а также проведено измерение распределения элементов по линии, перпендикулярной модифицированному слою. На рис. 4 приведены изображения одного и того же участка образца с 15 воздействиями во вторичных и обратно рассеянных электронах участка границы между измененным слоем (справа) и остальной частью образца (слева). Наблюдается значительное различие в изображении поверхности модернизированного слоя по сравнению с остальной частью образца как в рельефе (изображение во вторичных электронах), так и в элементном составе (изображение в обратно рассеянных электронах). Такая разница характерна для всех образцов с измененным поверхностным слоем.

В табл. 1 отражены результаты анализа элементного состава в весовых процентах нескольких участков образца, показанных на рис. 4б. Участок 1 и 2 из области измененного поверхностного слоя, участок 3 из области исходного материала, участок 4 из области более темного цвета рядом с границей модернизированного слоя. Из табл. 1 видно, что область темного цвета на границе измененного слоя обладает повышенной концентрацией азота и углерода.

Таблица 1

Концентрация элементов (вес. %) из разных участков образца с 15 воздействиями, показанных на рис. 4б

Участок	Элементы							
	C	N	Si	V	Cr	Fe	W	Mn
Спектр 1	7,96±0,22		0,36±0,03		11,38±0,12	79,58±0,35		0,72±0,08
Спектр 2	10,72±0,3		0,29±0,03	0,36±0,05	18,33±0,19	68,80±0,3	0,82±0,11	0,68±0,07
Спектр 3	8,42±0,23		0,37±0,03		9,99±0,1	79,18±0,35	1,16±0,15	0,88±0,09
Спектр 4	23,62±0,3	3,38±0,36	0,27±0,03		10,36±0,11	60,66±0,26	0,95±0,12	0,76±0,08

На поверхности модифицированного слоя в местах выхода из объема расплавленного вещества значительно изменен локальный элементный состав – повышены концентрации углерода и кремния. Изменение локальной концентрации элементов (углерод, азот) обнаружены и в объеме измененного слоя, а также в выделениях на границе с остальной частью образца.

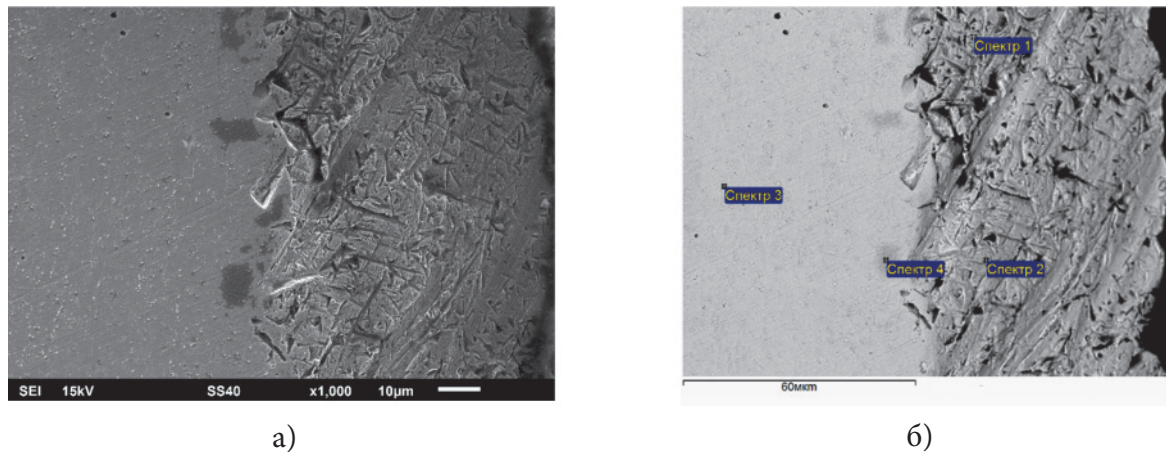


Рис. 4. СЭМ образца с 15 воздействиями во вторичных (а) и обратно рассеянных (б) электронах, увеличение 1000

### Список литературы

1. Грибков В.А., Григорьев Ф.И., Калинин Б.А., Якушин В.Л. Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки материалов. – М.: Круглый год, 2001. – 528 с.
2. Пименов В.Н., Грибков В.А., Иванов Л.И., Шольц М. и др. О новых возможностях применения установок плазменный фокус для модифицирования поверхностных слоев материалов. – Перспективные материалы. – 2003. – №1. – С. 13–23.
3. Gribkov V.A., Pimenov V.N., Ivanov L.I., Dyomina E.V., Maslyaev S.A., Miklaszewski R., Scholz M., Ugaste U.E., Doubrovsky A.V., Mezzetti F., Kulikauskas V.C., Zatekin V.V. Interaction of High Temperature Deuterium Plasma Streams and Fast Ion Beams with Condensed Materials in Dense Plasma Focus Device, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2003, v. 36, p. 1817–1825.
4. Якушин В.Л. Модифицирование углеродистых и низколегированных сталей потоками высокотемпературной импульсной плазмы // *Металлы*. – 2005. – №2. – С. 12–24.
5. В.М. Чернов, М.В. Леонтьева-Смирнова, М.М. Потапенко, Н.А. Полехина, И.Ю. Литовченко, А.Н. Тюменцев, Е.Г. Астафурова, Л.П. Хромова. Структурно-фазовые превращения и физические свойства ферритно-мартенситных 12%-ных хромистых сталей ЭК-181 и ЧС-139 // *Журнал технической физики*, 2016. – Т. 86. – Вып. 1. – С. 99–104.

## **Электрофизическое оборудование для исследований вакуумных свойств электровакuumных материалов и контроля герметичности газонаполненных приборов**

к.т.н. **С.А. Бушин**, к.т.н. С.Г. Давыдов, к.т.н. В.О. Ревазов, к.т.н. Р.Х. Якубов

ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова» – Москва, Россия

Для углубления познаний о физических процессах, протекающих в приборах, и в связи с постоянным их совершенствованием вопросы изучения качественного и количественного состава остаточной газовой среды в ЭВП, исследования газов, содержащихся на поверхности (при сорбции) и/или в объеме материала исследуемого образца (при абсорбции), а также контроля герметичности оболочек ЭВП были и остаются актуальными.

## **Electrophysical Equipment for Researching the Vacuum Properties of Electrovacuum Materials and the Leak Detection of Gas-filled Devices**

PhD **S.A. Bushin**, PhD S.G. Davydov, PhD V.O. Revazov, PhD R.Kh. Yakubov

FSUE Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA) – Moscow, Russia

To deepen knowledge about the physical processes occurring in devices, and in connection with their permanent improvement, the issues of studying the qualitative and quantitative composition of the residual gas environment in electrovacuum devices, the study of gasses, contained on the surface (upon sorption) and/or in the volume of the material under study (upon absorption), as well the leak detection of the shells of electrovacuum devices were and remain relevant.

Одним из наиболее актуальных направлений развития электровакuumных приборов (ЭВП) является увеличение сроков их службы. Ключевым фактором, определяющим срок службы ЭВП, является остаточная газовая среда. В процессе жизненного цикла приборов, начиная с изготовления и до эксплуатации, давление и состав газовой среды может изменяться. Эти изменения, в первую очередь, зависят от свойств применяемых материалов и технологии их обработки.

В рамках исследовательских работ была поставлена цель сформировать научно-технический задел по направлению изучения вакуумных свойств материалов, используемых при создании и выпуске приборов. В этой связи решение актуальной задачи по разработке и созданию контрольно-технологической аппаратуры (КТА) с сопроводительным методическим материалом для изучения вакуумных свойств и технологии обработки ЭВП целиком направлено на создание инструментария, с помощью которого после проведения соответствующих научных исследований и оценки полученных результатов следует, предположительно, рассчитывать на введение усовершенствований и/или уточнений в технологический процесс производства ЭВП, направленных на повышение их технических характеристик.

Проведённый анализ показал, что наиболее важным и полезным свойством для получения оценочной информации об особенностях материала, проявляемых в вакууме, следует считать газовыделение [1].



В связи с этим были проведены углубленное изучение и анализ методов измерения скорости газовой выделенности из числа наиболее действенных. При этом выбор был остановлен на нескольких методах, а именно: методе накопления и методе редукции давления [2, 3].

Основные методические положения инструкции регламентируют операции, предусматривающие подготовку макета и исследуемого объекта, вывод макета на режим измерений, загрузку образца, измерение общего давления, регистрацию, обработку и анализ полученной масс-спектрометрической информации.

Формирование конечных результатов основывается на обработке первичных данных, что предусматривает: 1) построение графиков, отражающих динамику изменения общего и парциальных давлений (характеристики ионных токов) газов на различных этапах анализа с выделением характерных участков сменяемых физических процессов (см. рис.1), 2) проведение оценки величин интенсивностей пиков  $I_i$  (A) на заданных массовых числах спектра при нагреве образца с занесением их значений в соответствующие таблицы, 3) сравнительный анализ спектров с учётом фоновой составляющей и вычисление прироста ионного тока на заданных массовых числах, 4) вычисление приращения полезного сигнала при оценке зависимостей общего давления, 5) проведение численного расчёта величин общего и парциальных давлений газа в объёме камеры накопления с образцом на основе математических зависимостей (уравнений измерений).

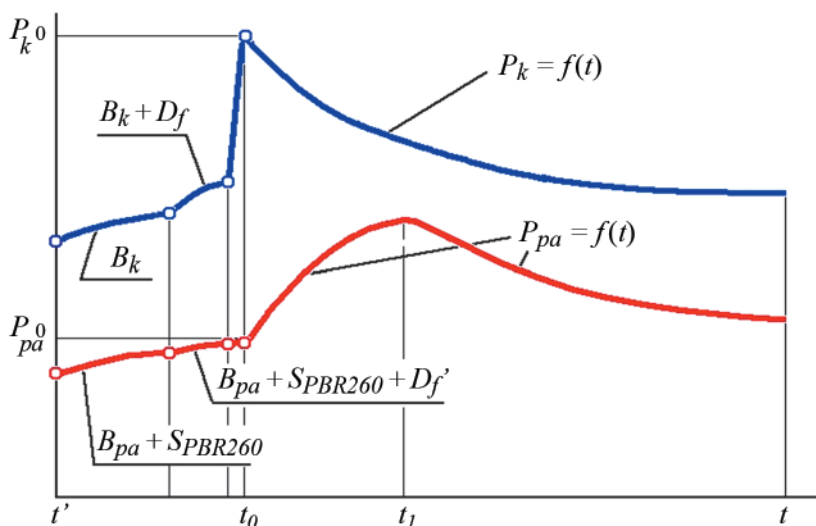


Рис. 1. Теоретическая зависимость изменения общего давления в камерах накопления ( $P_k$ ) и измерения и анализа газов ( $P_{pa}$ )

На рис. 1 проиллюстрированы типовые зависимости изменения давления в объёмах камеры накопления и камеры измерения и анализа, с характерными участками, отражающими следующие процессы:

1) повышение парциальных давлений фоновых газов после перекрытия откачки камеры накопления: участок  $B_k$  и участок  $B_{pa} + SPBR260$ , где  $B_k$ ,  $B_{pa}$  – интегрированный сорбционно-десорбционный потоки в камере накопления и измерения, соответственно;  $SPBR260$  – откачивающее действие ионизационного преобразователя.

2) появление дополнительных фоновых газов  $D_f$  и  $D_{f'}$  в результате перемещения механизма штока перекрывающего клапана: участок –  $B_k + D_f$  и участок –  $B_{pa} + SPBR260 + D_{f'}$ ;

3) повышение давления в результате сброса порции при нагреве материала образца: участки, следующие за  $B_k + D_f$  и  $B_{pa} + SPBR260 + D_{f'}$ .

Согласно методике измерений, на основе расчётных значений приращения общего давления в камере накопления на завершающем этапе обработки данных определяется итоговый результат косвенных измерений – количество выделившегося газа и скорость удельного газовыделения исследуемого образца при соответствующих режимах его нагрева.

Герметичность оболочек приборов электровакуумного производства является одним из важнейших условий, определяющих их работоспособность. Контроль герметичности сопряжен с проверкой соответствия выявляемой экспериментально степени негерметичности и устанавливаемой в КД нормой по данному показателю.

Для обеспечения современных требований по сроку хранения, рассчитанных на долгосрочную перспективу, у приборов, относящихся к газонаполненным миниатюрным разрядникам со штенгельной конструкцией, по техническим требованиям показатель степени негерметичности должен соответствовать норме на уровне  $1,2 \cdot 10^{-13}$  Па·м<sup>3</sup>/с (по воздуху). В полости приборов данного типа в качестве рабочего газа для заполнения используется инертный газ-неон, величина парциального давления которого близка к значению барометрического давления.

Существующая технология контроля герметичности газонаполненных разрядников включает в себя два этапа – это проведение испытаний оболочки разрядника на гелиевом течеискателе, а по окончании термообработки и заполнения рабочим газом после пережата штенгеля – проверкой герметичности ответной части штенгеля. Качество пластичной сварки обеспечивается технологическим заделом. С этой целью периодически производится контроль инструмента пережата и качества сварного шва на основе металлографического метода путём изготовления шлифов и исследования структуры материала в зоне контакта.

Тем не менее, такой подход не обеспечивает гарантированного отсутствия течи по месту пережата. В результате последующих технологических воздействий на прибор может произойти как разгерметизация оболочки прибора, так и образование течи по шву, образованному пластичной сваркой.

В связи с этим возникла необходимость в практической реализации 100%-ого финишного контроля герметичности с чувствительностью, не превышающей значения заданной нормы с тем, чтобы обеспечить выполнение одного из основных принципов течеискания – проведение контроля герметичности после завершения всего цикла обработки прибора, включая термовакуумную обработку, а также всех операций, связанных с его герметизацией.

В этих целях был разработан и создан промышленный образец вакуумного технологического оборудования, называемый установкой финишного контроля герметичности (УФКГ) [4–6]. Следует отметить, что разработанный образец не имеет отечественных и зарубежных ближайших аналогов по следующим его особенностям:

- наличие прогреваемых цельнометаллических сверхвысоковакуумных управляемых клапанов позволяет реализовать не только возможность управления процессом контроля герметичности, но и создает условия для достижения минимальных фоновых потоков, что способствует обеспечению высокого показателя чувствительности измерительной системы установки – не более  $5,0 \cdot 10^{-14}$  Па·м<sup>3</sup>/с;

- погрешность измерения потока утечки газа из контролируемого прибора не превышает 7,8 % [7], благодаря использованию в целях калибровки измерительной системы эталонных средств в перекрывающем приблизительно в семь десятичных порядков диапазоне – от  $5,0 \cdot 10^{-5}$  до 1 Па и от 1 до 133,3 Па с погрешностями измерений не более  $\pm(10 \dots 5)\%$  и  $\pm 2\%$ , соответственно для каждого диапазона;

- оптимальный выбор исполнительных механизмов и контрольно-измерительной аппаратуры установки обеспечивает автоматизацию всего цикла финишного контроля герметичности изделий.

В основу методики контроля герметичности положен масс-спектрометрический метод с использованием способа накопления [8]. Содержание последнего аналогично совокупности и порядку действий, производимых при измерении скорости газовыделений: контролируемое изделие, размещаемое в объёме (камере накопления), сначала откачивают, после чего откачку перекрывают, и через заданный интервал времени накопленную порцию рабочего газа (неон), истекающего из исследуемого объекта (при наличии течи), перепускают в изолированный от откачки объём с подсоединённым датчиком масс-спектрометра. Далее регистрирующей системой анализатора производится обнаружение контролируемого газа, его фиксация и количественный анализ: в зависимости от парциального давления неона определяется степень негерметичности контролируемого прибора.

Наиболее благоприятными условиями представления образцов для проведения контроля, с точки зрения продолжительности их предварительной откачки перед выходом установки на режим измерений, является отсутствие следов загрязнений органического происхождения на внешней поверхности объекта исследования, например, облоя компаунда (эпоксидной смолы).

Для контроля герметичности могут быть использованы любые другие приборы аналогичные и сходные по своим основным параметрам – геометрическим размерам, рабочему газу, материалам оболочки.

Таким образом, разрабатываемое во ФГУП «ВНИИА» электрофизическое оборудование способствует решению поставленных задач, направленных на углублённое изучение физических процессов, протекающих в ЭВП при их изготовлении, работе и хранении, что, в свою очередь, является залогом для дальнейшего совершенствования и повышения надёжности производимой в институте продукции.

### Список литературы

1. Черепнин Н.В. Основы очистки, обезгаживания и откачки в вакуумной технике. – М.: Советское радио, 1967. – С. 408.
2. Кузьмин В.В. Абсолютный метод измерения давлений в области ниже  $10^{-5}$  тор. // В сб. «Физика и техника сверхвысокого вакуума», 1968. – С. 177–183.
3. Ерюхин А.В., Кузьмин В.В. Точность воспроизведения единицы давления в области высокого и сверхвысокого вакуума абсолютным методом редукции давления // Измерит. техника, 1970. – №5. – С. 41–44.
4. Патент №101072 на промышленный образец РФ, МКИ G 01 М 3/02, 3/26. Автоматизированная установка финишного контроля герметичности / Г.А. Смирнов, А.С. Хапов, Т.И. Козловская, С.А. Бушин, А.П. Баканов, Е.В. Черных, С.С. Галкин. ФГУП ВНИИА; Заявл. 24.08.15; Оpubл. 28.11.16.
5. С.А. Бушин. Методика высокочувствительного контроля герметичности газонаполненных разрядников по истечению неона // Вакуумная техника и технология, Санкт-Петербург, 2012. – N. 22, №2. – С. 98, 99.
6. С.А. Бушин, С.С. Галкин. Масс-спектрометрическая автоматизированная установка финишного контроля герметичности газонаполненных разрядников // Материалы XX международного семинара «Спектрометрический анализ. Аппаратура и обработка данных на ПЭВМ». Обнинск, 2013.
7. Отчёт №Т401-11/21-10 по метрологической аттестации методики финишного контроля герметичности ТИР142. – М.: ВНИИА, 2010. – С. 21.
8. Финишный контроль герметичности ТИР142 по истечению неона: Методика №Пм Т401/22-2012. – М.: ВНИИА, 2012. – С. 35.

## Влияние конструктивных характеристик импульсной ксеноновой лампы на электрофизические свойства плазмообразующей среды

д.т.н. **С.В. Гавриш**, С.Г. Киреев, к.т.н. Д.Н. Кугушев, Д.Ю. Пугачев, к.т.н. С.В. Пучнина

ООО «НПП «Мелитта» - Москва, Россия

В данной работе приведены результаты расчетных и экспериментальных исследований влияния размеров балластных объемов импульсной ксеноновой газоразрядной лампы на электрофизические параметры и характеристики излучения плазменного канала. На основе полученных результатов даются рекомендации по конструированию высокоэффективных импульсных источников излучения в УФ спектральном диапазоне.

## Influence of the Design Characteristics of a Pulsed Xenon Lamp on the Electrophysical Properties of the Plasma-forming Medium

Dr. **S.V. Gavrish**, S.G. Kireev, PhD D.N. Kugushev, D.Y. Pugachev, PhD S.V. Puchnina

Scientific and Production Enterprise "Melitta", Ltd - Moscow, Russia

This paper presents the results of computational and experimental studies of the effect of the dimensions of the ballast volumes of a pulsed xenon gas-discharge lamp on the electrophysical parameters and characteristics of the radiation of the plasma channel. Based on the results obtained, recommendations are given for the design of highly efficient pulsed radiation sources in various spectral ranges.

Излучение импульсного ксенонового разряда характеризуется высокой мгновенной мощностью в спектральном диапазоне от 0,2 до 4,0 мкм [1], что предопределило востребованность импульсных ксеноновых ламп (рис. 1) в квантовой электронике (лампы накачки лазеров), светосигнальных устройствах, установках УФ обеззараживания воздуха и т.д.

В зависимости от режимов электрического питания (напряжение и емкость разрядного контура) и конструктивных параметров (диаметр и длина плазменного канала  $L$ , объем  $V_3$  заэлектродных (балластных) зон, давление ксенона и т.д.) эффективность преобразования электрической мощности в энергетический поток излучения (КПД) будет меняться в различных спектральных интервалах.

В данной работе рассмотрено влияние величины балластного объема  $V_3$  на электрические характеристики импульсных ксеноновых ламп и энергетическую экспозицию излучения в УФ диапазоне.

**Теоретический аспект проблемы.** Известно [1], что наличие заэлектродных объемов  $V_3$  в импульсной лампе (рис. 1) неизбежно приводит к падению давления ксенона в разряде  $p$  при прохождении импульса тока. Выполним оценку снижения  $p$  в рабочей части лампы  $L$ .

Пусть  $N$  – плотность газа в холодной лампе, а  $T_p$  и  $T_3$  – средняя по сечению температура газа ( $K$ ) в разрядной части и балластном объеме работающей лампы, соответственно. Тогда, исходя из условия равенства давления газа в балластном объеме и в разрядной части,  $N_p$  будем иметь:

$$N_p / N = (1 + V_3 / V_p) (1 + T_p V_3 / T_3 V_p)^{-1}.$$

Далее, учитывая, что  $N = np$  (где  $p$  в атм.,  $n$  – плотность газа при  $T=300$  К и давлении  $p=1$  атм.), и полагая  $N_p = \text{const}$  (условие постоянства напряжения на лампе), получаем:

$$p / p_0 = (1 + T_p V_3 / T_3 V_p) (1 + V_3 / V_p)^{-1}. \quad (1)$$

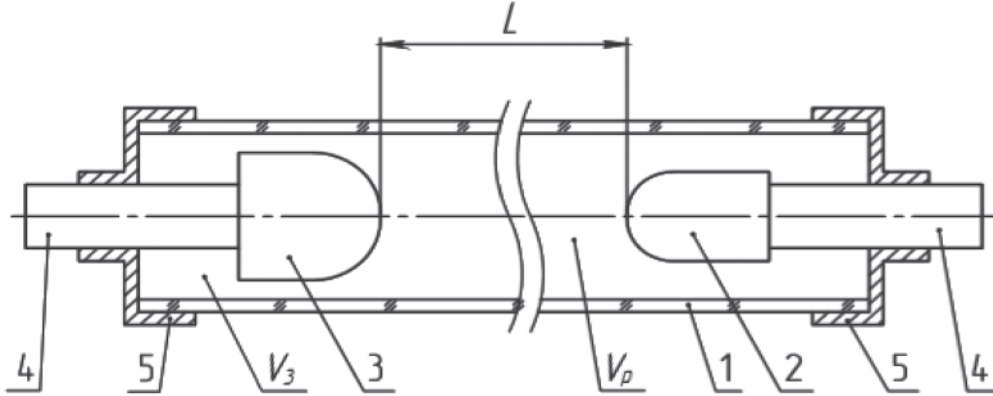


Рис. 1. Конструкция импульсной ксеноновой лампы:

1 – кварцевая оболочка, 2 – катод, 3 – анод, 4 – токовводы, 5 – герметизирующие элементы, L – межэлектродное расстояние,  $V_p$  и  $V_3$  – разрядный и заэлектродный объем, соответственно

Величину  $T_p$  можно найти по известному распределению температуры по сечению разряда, а  $T_3$  – из решения уравнения теплопроводности для цилиндра с заданными граничными условиями, если известны температура электродов и температура внутренней стенки разрядной трубки.

Из уравнения (1) следует что, чем выше температура разряда (что важно для достижения высокой эффективности излучения ксенонового разряда в УФ области) и величина балластного объема, тем меньше давление разряда в межэлектродном пространстве. Данный эффект неизбежно повлечет за собой изменение целого ряда характеристик разряда и потребует корректировки конструкции газоразрядной лампы и согласования разрядного контура.

**Экспериментальные исследования.** Для проверки сделанного теоретического предположения была изготовлена партия импульсных ксеноновых ламп, в которых изменение величины балластного объема производилось варьированием длины специальной проточки (уменьшением диаметра) у держателя электрода (рис. 2).



Рис. 2. Фото электродных узлов, демонстрирующее способ регулирования заэлектродного объема  $V_3$



Для распространения полученных в данной работе результатов на другие типы газоразрядных ламп в качестве критерия изменения  $V_3$  принято соотношение  $V_3/V_p$ , где  $V_p$  – объем разрядного (межэлектродного) пространства.

Из представленных данных можно сделать следующие заключения:

1. Плотность тока  $j_l$  в квазистационарной стадии импульсного ксенонового разряда и энергетическая экспозиция  $W_u$  в ультрафиолетовом диапазоне с увеличением  $V_3/V_p$  корреляционно уменьшается по закону близкому к линейному (рис. 3 и 4).

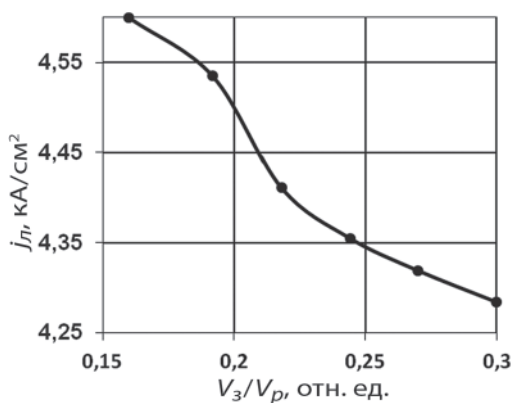


Рис. 3. Зависимость плотности тока  $j_l$  в квазистационарной стадии разряда от соотношения  $V_3/V_p$

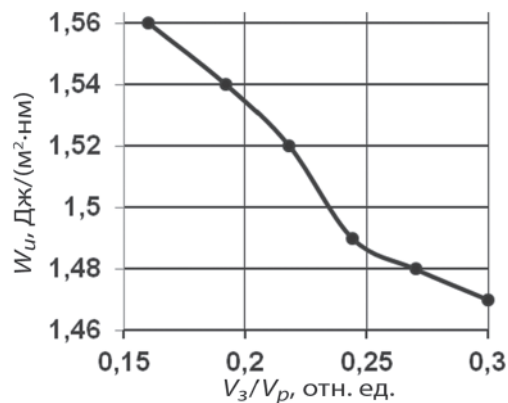


Рис. 4. Зависимость энергетической экспозиции излучения  $W_u$  в спектральном диапазоне 200–300 нм от соотношения  $V_3/V_p$

2. Увеличение  $V_3/V_p$  в два раза приводит к снижению  $j_l$  и  $W_u$  на 7%.

3. При выходе в номинальный режим работы импульсной ксеноновой лампы по мере повышения средней температуры разряда плотность тока снижается для всех соотношений  $V_3/V_p$  по идентичному закону (рис. 5).

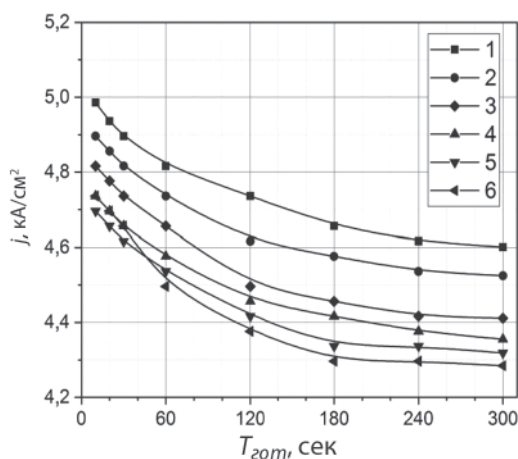


Рис. 5. Временная зависимость плотности разрядного тока для различных соотношений  $V_3/V_p$ :  
1 – 0,16; 2 – 0,192; 3 – 0,218; 4 – 0,244; 5 – 0,270; 6 – 0,3

4. С момента зажигания разряда до выхода в номинальный режим работы импульсной ксеноновой лампы при увеличении отношения  $V_3/V_p$  наблюдаются различные падения плотности тока  $j_l$  в разряде, например, для  $V_3/V_p = 0,15$  данный параметр снижается на 7%, в то время как для  $V_3/V_p = 0,3$  падение достигает 9%. Указанное явление связано с процессом установления газодинамического равновесия.

Поясним данное явление теоретически. Как отмечалось выше, при высоких концентрациях энергии и значительной длительности импульса ( $t_u \geq 10-3$  с) происходит уход значительной доли рабочего газа в заэлектродные объемы, поэтому плотность частиц в разряде  $n_p$  к моменту достижения максимума тока становится меньше почти в два раза от начальной концентрации  $n_0$ . Данный процесс равносителен снижению исходного давления в разряде [1]. Проведем анализ времени установления  $t_y$  газодинамического равновесия (момент достижения квазистационарной стадии разряда).

В работе [1] для обычной конструкции импульсных трубчатых ламп отношение заэлектродного объема  $V_z$  к рабочему объему  $V_p$  лежит в пределах 0,04–1,0 (аналогично нашему случаю), для которых справедливо выражение [2]:

$$\frac{n_t}{n_0} = 0,65 \cdot \frac{1 + \frac{V_z}{V_p}}{1 + 4 \cdot \frac{V_z}{V_p}}. \quad (2)$$

Скорость ухода  $v_y$  газа в заэлектродные объемы составляет около  $5 \cdot 10^4$  см/с, что соответствует скорости звука при усредненной по объему канала температуре.

Исходя из этого, время установления  $t_y$ , которое существенно зависит от длины разрядного промежутка, определяется выражением [3]:

$$t_y = \frac{l \left(1 - \frac{n_t}{n_0}\right)}{2v_y}. \quad (3)$$

Совместное решение уравнения (2) и (3) для граничных точек полученного нами экспериментального диапазона  $0,16 < V_z/V_p < 0,3$  позволило определить время установления газодинамического равновесия 150 и 160 мкс, соответственно. Таким образом, чем значительнее балластный объем в импульсной лампе, тем медленнее достигается квазистационарная стадия, тем больше безызлучательных потерь энергии в разряде.

**Заключение.** Выполненные в работе расчетные и экспериментальные исследования показали, что увеличение заэлектродного объема в импульсной ксеноновой лампе приводит к падению плотности тока и, как следствие, снижению эффективности излучения в УФ спектральном диапазоне. Дополнительно показано, что при больших балластных объемах достижение номинальных электрических параметров импульсной ксеноновой лампы происходит значительно медленнее. Данное явление связывается с процессами установления газодинамического равновесия.

### Список литературы

1. Импульсные источники света / И.С. Маршак, А.С. Дойников, В.П. Жильцов и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1978. – 472 с.
2. Васьковский Ю.М., Кирсанов В.П., Нарожная Т.П. Влияние балластных объемов импульсных трубчатых ламп на их параметры // Светотехника. – 1979. – №10. – С. 19–20.
3. Быков И.В., Кирсанов В.П., Трошкин С.В. Работа импульсных ламп большого диаметра с сокращенной длительностью импульса // Квантовая электроника. – 1975. – Т. 2. – №1 – С. 181–184.

## Экспериментальное исследование электродных систем ионизационных камер деления для ядерных реакторов с натриевым теплоносителем

**Я.В. Глазюк**, к.т.н. В.П. Алферов, Б.С. Саламаха, М.Л. Житченко, К.С. Трофимов

АО «Красная Звезда» – Москва, Россия

Уровень ядерной безопасности реакторных установок (РУ) в большой степени определяется качеством контроля мощности РУ по нейтронному потоку. На РУ БН этот контроль осложняется двумя факторами – высокой окружающей температурой (до 600 °С) и высоким уровнем гамма-фона в первые ~60 часов после остановки реактора, что существенно с точки зрения обеспечения надежного контроля РУ при аварийных остановках.

Важнейшими параметрами, определяющими возможность применения ИКД в соответствующих условиях, являются величина заряда в импульсе при регистрации нейтронного излучения, а также амплитуда переменного сигнала ИКД, вызываемого гамма-излучением.

В работе приведены результаты измерений и обработки амплитудных спектров сигналов ряда промышленных, опытных и макетных образцов ионизационных камер, выполненные отделением НПЦ «ЭЛЕГИЯ» АО «Красная Звезда».

## Experimental Study Fission Chamber Electrode Systems for Nuclear Reactors with Primary Sodium Coolant

**Y.V. Glazyuk**, PhD V.P. Alferov, B.S. Salamakha, M.L. Zhitchenko, K.S. Trofimov

JSC "Krasnaja Zvezda" – Moscow, Russia

To a large extent, the reactor plant nuclear safety level is determined by the available instrumentation to control neutron flux intensity. For fast reactor plants two factors further complicate control processes, i. e. high environment temperature (up to 600 °С) and high levels of background gamma radiation during the first ~60 hours after reactor shutdown, which is essential for reactor plant control during emergency shutdowns.

The critical parameters that determine FC usability in such conditions are the pulse charge value when neutron radiation is detected and the amplitude of the gamma-activated FC variable signal.

The study was conducted at the NPC “ELEGIA” branch of the JSC “Krasnaja Zvezda” and includes measuring and processing results for signal amplitudes as produced by a number of IC industry, prototype and test models.

Традиционным для ионизационных камер, применяемых для контроля РУ, являются плоскопараллельная и коаксиальная геометрии электродной системы. Электрическое поле в реальной конструкции ИКД с плоскими электродами (например, КНК 15-1) заметно отличается от равномерного за счет наличия конструктивных отверстий в электродах. Наличие этих отверстий приводит к тому, что часть треков от осколков деления радиатора ИКД оказывается вне рабочего промежутка электродной системы [1], что может снижать как коэффициент преобразования плотности потока нейтронов, так и заряд в импульсе ИКД на один нейтрон.

Более низкое значение заряда в импульсе ИКД КНК 15 по сравнению с ИКД КН 010 разработки НПЦ «ЭЛЕГИЯ», имеющей коаксиальную электродную систему, при штатном включении подтверждается при сравнении результатов обработки амплитудных спектров сигналов этих камер, зарегистрированных по методике [2] при помощи комплекса «Автотест» [3], приведенных в табл. 1.

Таблица 1

Расчетные значения среднего заряда импульсов ИКД, превышающих порог

Порог, $10^{-13}$ Кл	1	1,1	1,2	1,4	1,6	1,8	1,9
КНК 15-1, $10^{-13}$ Кл*	1,66	1,72	1,78	1,95	2,13	2,32	2,40
КН 010 (1), $10^{-13}$ Кл*	1,91	2,00	2,07	2,23	2,41	2,57	2,66
КН 010 (2), $10^{-13}$ Кл*	1,47	1,56	1,66	1,85	2,07	2,26	2,35
* – указан средний заряд импульсов, превышающих порог							

КН 010(1) – внешний электрод 0, внутренний электрод +E (штатное включение).

КН 010(2) – внешний электрод +E, внутренний электрод 0.

Спектры сигналов для разного подключения электродов ИКД к источнику смещения (т.е. разного направления электрического поля в рабочем зазоре) практически совпадают для КНК-15-1 и заметно различаются для КН 010. Соответственно различаются значения среднего заряда в импульсе КН 010 при разном подключении электродов (табл. 1). Существенным отличием электродной системы КН 010 является заметная разница площади внешнего и внутреннего электродов коаксиальной пары. Эта разница приводит к различию спектров из-за пространственной неоднородности ионизации в межэлектродном промежутке, обусловленной характером взаимодействия осколков со средой. Удельные ионизационные потери энергии тяжелой заряженной частицы описываются известной формулой Бете-Блоха, в соответствии с которой  $dE/dx \sim k z^2/v^2$  ( $z$  – заряд,  $v$  – скорость частицы).

Экспериментальные данные о величине  $dE/dx$  для «тяжелого» осколка в воздухе, полученные методом регистрации коллимированного пучка осколков деления, проходящего между плоскопараллельными электродами ионизационной камеры, приведены в [4]. Удельные ионизационные потери энергии осколка деления в начале пробега почти на порядок превышают таковые в конце пробега. С учетом косинусоидального характера пространственного распределения вероятности вылета осколка под углом  $\varphi$  к плоскости радиатора становится ясным, что максимум плотности ионизации рабочего газа ионизационной камеры (как правило, аргона) достигается в области, непосредственно примыкающей к радиатору (электроду). В таких условиях время собирания положительных ионов рабочего газа, образовавшихся на расстояниях, много меньших межэлектродного зазора от электрода с более низким потенциалом, сравнивается с временем собирания электронов, т.е. вклад ионного тока в «быструю» составляющую выходного импульса камеры становится существенным. Поэтому, если электрод с большей площадью покрытия имеет более низкий потенциал, чем другой электрод, то вклад ионной составляющей в «быструю» составляющую импульса будет больше, чем в противном случае. Для электронной составляющей заряда в газе направление электрического поля в межэлектродном зазоре не имеет значения в силу гораздо большей подвижности электронов по сравнению с ионами.

Подтвердить факт влияния ионной составляющей на заряд в импульсе позволяют результаты регистрации спектров сигналов макета ИКД с электродной системой с покрытием ураном одного электрода, приведенные на рис. 1.



Рис. 1. Спектр сигнала ИКД с покрытием ураном одного электрода:

1 – электрод с покрытием +E, электрод без покрытия 0; 2 – электрод с покрытием 0, электрод без покрытия +E

Спектр 1 на рис. 1 определяется электронной составляющей заряда в газе и отражает вид распределения осколков деления по массе и, соответственно, по энергиям. Вклад собираемой одновременно с электронами части ионной составляющей заряда характеризуется большим разбросом, т.к. сильно зависит от угла вылета из радиатора и энергии осколка. Поэтому итоговое распределение 2 получается из распределения 1 путем суммирования с ним «размывающего» распределения вклада ионной составляющей.

Приведенные результаты регистрации спектров сигналов и расчетов значений средних зарядов в импульсе ИКД показывают заметное преимущество коаксиальной геометрии электродной системы по сравнению с реальной плоской.

В отличие от нейтронов, при регистрации которых ионизируется газ в межэлектродном пространстве, гамма-излучение вызывает выход электронов как из электродов, так и из элементов конструкции ИКД – корпуса, соединительных элементов. По этой причине сигнал ИКД, в том числе его переменная составляющая, важная при работе в импульсном режиме, является комбинацией нескольких составляющих, оценить вклад каждой из которых затруднительно. Экспериментальные результаты исследования коаксиальной электродной системы ИКД КН 032 в полях гамма-излучения приведены на рис. 2.

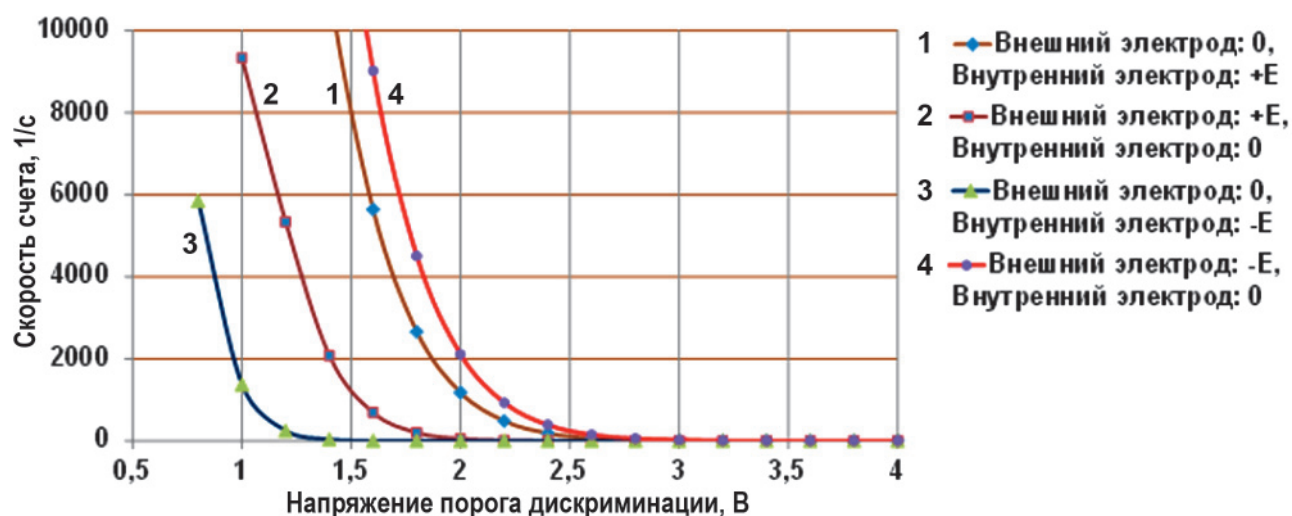


Рис. 2. Дискриминационные характеристики КН 032 в отсутствие нейтронов при мощности экспозиционной дозы 130 000 Р/ч



Для коаксиальной электродной системы с заметно разными по диаметру (и площади) электродами, как у КН 032, имеет место существенное и ярко выраженное влияние направления электрического поля в межэлектродном зазоре. Результаты, приведенные на рис. 2, показывают, что, как при положительном, так и при отрицательном смещении, импульсная чувствительность к гамма-излучению меньше в том случае, когда поле направлено от внешнего (большого) электрода к внутреннему (меньшему). При этом отрицательное смещение обеспечивает наименьшую чувствительность к гамма-излучению, однако это сопровождается заметным уменьшением заряда в импульсе ИКД и, соответственно, уменьшением импульсной чувствительности к нейтронам.

Преодолеть этот недостаток позволяет конструкция с диаметром электродной системы, заметно большим, чем межэлектродный зазор. По своим свойствам относительно влияния направления поля на чувствительность к нейтронам такая система приближается к плоскопараллельной. При этом удается заметно уменьшить влияние краевых эффектов, выбирая её соответствующую длину. Исследована ИКД с системой диаметром около 60 мм. Уменьшение чувствительности при отрицательном смещении ИКД не превышает 15% при рабочих значениях напряжения порога (1,6...3,0 В).

Результаты исследования действия гамма-излучения на эту ИКД подтвердили ранее полученный результат о меньшей гамма-чувствительности в случае использования отрицательного смещения.

### Список литературы

1. Е.К. Малышев. Нейтронные ионизационные камеры для СУЗ ядерных реакторов. // Сб. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика и техника ядерных реакторов. – М. – 1984. – Вып. 5 (42). – С. 76–83.
2. В.П.Алферов, В.А. Федоров, Г.П.Кириченко. Характеристики импульсов ионизационных камер деления // Приборы и техника эксперимента. – 2000. – №6. – С. 25–27. (Characteristics of Pulses Used in Ionization Fission Chambers. Alferov, V.P., Fedorov, V.A., Kirichenko, G.P. Instruments and Experimental Techniques. 2000, 43(6), p. 747–749).
3. Г.Н. Алексаков. Аппаратно-программный комплекс для поддержки метрологических служб АЭС // Сб. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика и техника ядерных реакторов. – М. – 2005. – Вып. 49, часть 2. – С. 42–48.
4. К.Н. Мухин. Экспериментальная ядерная физика. – Т. 1. – М., Атомиздат, 1974 г., §47.1. Свойства осколков деления.

## **Особенности построения измерительных каналов радиационного мониторинга АЭС большой мощности с учетом проектных требований объектов контроля**

Е.М. Ветошкин, **А.С. Гордеев**, А.А. Иванов, А.В. Калинин, Р.А. Насибуллин,  
д.т.н. С.Б. Чебышов, И.И. Черкашин

АО «СНИИП» – Москва, Россия

В докладе представлен обзор по номенклатуре и основным техническим требованиям, предъявляемым к программно-техническим средствам радиационного контроля для построения стационарных измерительных каналов, применяемых в составе информационно-измерительных систем на АЭС большой мощности референтных и реализуемых в настоящее время проектов российского дизайна. Выполнено сравнение эксплуатационных и метрологических характеристик представленного на рынке оборудования автоматизированных систем радиационного контроля в сопоставлении с проектными требованиями. Сделаны обобщающие выводы о перспективах развития направления радиационного контроля с учетом дальнейшего совершенствования аппаратуры и опыта создания и ввода в действие АСУ ТП АЭС при их сооружении и модернизации.

## **Constructive Features of the Radiation Monitoring Measuring Channels for the High Power NPPs Subject to the Monitoring Objects Design Requirements**

E.M. Vetoshkin, **A.S. Gordeev**, A.A. Ivanov, A.V. Kalin, R.A. Nasiboulin,  
Dr. S.B. Chebyshov, I.I. Cherkashin

JSC "SNIIP" – Moscow, Russia

The paper presents the overview of the list and main technical requirements of the radiation monitoring hardware and the software for the stationary measuring channels construction that are used as part of the information measuring systems for the high power NPPs made by Russian design which are in operation and under construction. The comparison of the working and the metrological parameters of the automated radiation monitoring systems equipment up to the market considering the design requirements has been performed. The common conclusions of the development trends for the radiation monitoring direction according to the future equipment improvement and the references of Instruments and Control for NPPs creation and installation during their construction and modernization have been made.

Настоящий период развития атомной энергетики и промышленности во всем мире характеризуется интенсивно проводимыми работами по проектированию, сооружению и продлению сроков эксплуатации АЭС большой мощности. При этом безусловный приоритет на этапе выбора и реализации организационных и технических решений отдается вопросам безопасности объектов использования атомной энергии, включая все возможные аспекты ядерной и радиационной безопасности.

Основными инструментами, обеспечивающими радиационную безопасность АЭС, являются автоматизированные системы радиационного контроля (АСРК), предназначенные для

получения, сбора, обработки, регистрации и представления информации о параметрах, характеризующих радиационное состояние энергоблоков и общестанционных сооружений АЭС и окружающей среды при всех режимах работы энергоблоков, включая проектные аварии, а также о состоянии энергоблоков при выводе из эксплуатации.

АСРК является одной из подсистем АСУ ТП АЭС, и на нее распространяются все требования к метрологическому обеспечению, предъявляемые к оборудованию, важному для безопасности. При этом имеются специфические особенности, характерные для АСРК: широкие диапазоны измерений (до 15 десятичных порядков) с нормированной погрешностью во всем диапазоне; необходимость использования источников ионизирующих излучений (ИИИ) для проведения метрологического обслуживания (поверки); режимы функционирования оборудования связаны с отбором проб радиоактивных сред и расположением измерительных каналов в зонах с контролируемым доступом персонала; АСРК не вырабатывает управляющих сигналов, являясь информационно-измерительной системой; оборудование АСРК не подлежит калибровке. Ряд требований, предъявляемых к АСУ ТП, не применим к элементам АСРК, чувствительным к ионизирующему излучению (например, по радиационной устойчивости).

В состав современных АСРК АЭС большой мощности входят измерительные каналы (ИК) для измерения следующих физических величин: мощность амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) и мощность поглощенной дозы (МПД) гамма-излучения (включая значения при максимальной проектной аварии), объемная активность (ОА): инертных радиоактивных газов (ИРГ), радиоактивных аэрозолей,  $I^{131}$ , воды (в дистанционном, проточном и погружном варианте геометрии), технологических сред,  $N^{16}$  в «остром паре» трубопроводов,  $Na^{24}$  в солевом остатке, радионуклидов в теплоносителе первого контура и в выбросах, индивидуальный эквивалент дозы рентгеновского, гамма-, бета- и нейтронного излучений, активность радионуклидов в органах и теле человека, а также плотность потока бета-частиц с поверхности и параметры воздушного потока. В зависимости от проектной конфигурации АЭС и коммерческих условий поставки в состав АСРК могут включаться: аппаратура радиационного контроля течи теплоносителя из первого контура во второй контур (АРКТ), программно-технические средства для периодического и эпизодического контроля (ПЭК), а также блоки и устройства детектирования для радиационного контроля окружающей среды, перемещений персонала и транспорта, оборудование контроля при обращении с радиоактивными отходами.

Приведенный перечень ИК подсистем АСРК радиационного контроля помещений, радиационного технологического контроля, индивидуального дозиметрического контроля и радиационного контроля загрязнений является исчерпывающим и соответствует конфигурации АСРК для проектов АЭС-2006, ВВЭР-ТОИ и перспективных проектов.

Имеются существенные предпосылки для оптимизации комплекса требований к объему радиационного контроля для обеспечения унификации и типизации ИК в рамках реализации перспективных проектов АЭС.

При интеграции АСРК в состав АСУ ТП АЭС учитываются специфические особенности реализации ИК, в том числе в процессе определения требований к их эксплуатационным и метрологическим характеристикам.

Требования к устойчивости оборудования ИК АСРК к внешним воздействующим факторам (ВВФ) во многом определяются географией размещения АЭС на территории России и за рубежом, включая такие страны, как Турция (АЭС «Аккую»), Бангладеш (АЭС «Руппур»), Индия (АЭС «Куданкулам»), Египет (АЭС «Эль-Дабаа») и др.

Сравнение требований к значениям ВВФ для различных проектов сооружения АЭС в России и за рубежом приведено в табл. 1. Очевидно, что для достижения технической конкурентоспособности АСРК за счет унификации программно-технических средств оборудование ИК должно удовлетворять наиболее жестким условиям эксплуатации.

Таблица 1

Значения ВВФ

Фактор	[1]	[2]	[3]	[4]
Сейсмостойкость	II	II и III	I и II	II
Помехоустойчивость по ГОСТ 32137	III по ГОСТ Р 50746-200	IV	III, IV	III, IV
Климатическое исполнение	УХЛ	T	T	УХЛ
Тип атмосферы	II	IV	III	II
Коррозионные агенты, не более, мг/м <sup>3</sup>	нет требований	хлориды: 0,267; сульфаты: 0,022	хлориды: 0,267; сульфаты: 0,022	нет требований
Внешний гамма-фон	нет требований	нет требований	1 Гр/ч	10 <sup>-3</sup> Гр/ч

Отмечается тенденция, когда в основу проектных требований к метрологическим характеристикам ИК АСРК ложатся параметры конкретных производителей оборудования, соответствующие физические расчеты радиационных величин зачастую не проводятся, а производители оборудования таким образом обеспечивают свои конкурентные преимущества на российском сегменте рынка. В ряде случаев проектные требования по диапазону и точности измерений превышают потребность, обусловленную параметрами технологических процессов, то есть являются избыточными. Избыточность требований к метрологическим характеристикам отдельных измерительных каналов ухудшает эксплуатационные возможности АСРК в целом, требует дополнительных затрат на приобретение оборудования (включая поверочные установки, эталоны, образцовые ИИИ) в существенно ограничивает типизацию и унификацию технических решений как в пределах одного проекта, так и между проектами-аналогами.

С учетом вышеизложенного, на основе сравнения требований к диапазонам и точности измерений, содержащихся в частных технических заданиях на разработку АСРК для проектов современных АЭС поколения 3+ [1–4], сопоставления уровня конкурентных аналогов, представленных на рынке АСРК, а также анализа содержания руководящего документа АО «Концерн Росэнергоатом» по объему радиационного контроля на АЭС [5], в табл. 2 приведен перечень типовых ИК АСРК, по метрологическим характеристикам удовлетворяющих потребностям перспективных проектов АЭС.

Следует отметить, что в рамках процедуры утверждения типа средства измерений в общем случае проводят испытания для целей утверждения типа ИК. В состав ИК входят: непосредственно оборудование нижнего уровня (блоки и устройства детектирования) утвержденного типа, блоки и устройства обработки информации нижнего уровня (как правило, также утвержденного типа) и технические средства верхнего уровня для отображения информации с использованием человеко-машинных интерфейсов. Оборудование функционально законченных ИК, следуя цели повышения эргономических качеств АСРК, размещается на стендах радиационного контроля, имеющих в своем составе запорно-регулирующую арматуру, средства отбора проб, устройства локального управления работой ИК, блоки коммутации, питания и сигнализации, а также измерители физических параметров (расходомеры и пр.).

В заключение необходимо отметить возрастающий объем и значимость параметров, контролируемых при помощи спектрометров из состава АСРК. Внедрение методов спектрометрического анализа в состав устройств детектирования ОА ИРГ и жидкостей, помимо измерения парциальных ОА реперных радионуклидов, позволяет повысить качество измерительной информации посредством учета удельного состава контролируемых сред при расчете суммарной ОА.

Таблица 2

## Перечень типовых ИК АСРК

Наименование контролируемых параметров	Диапазоны измерений (диапазон регистрируемых энергий)	Пределы основной относительной погрешности, %
МАЭД гамма-излучения	от $1,0 \cdot 10^{-7}$ до $1,0 \cdot 10^2$ , Зв/ч (от 0,05 до 8,0, МэВ)	$\pm 20$
МПД гамма-излучения	от $1,0 \cdot 10^{-7}$ до $1,0 \cdot 10^2$ , Гр/ч (от 0,06 до 3,0, МэВ)	$\pm 25$
МПД гамма-излучения (для аварийных условий)	от $3,0 \cdot 10^{-3}$ до $1,0 \cdot 10^5$ , Гр/ч (от 0,06 до 3,0, МэВ)	$\pm 30$
ОА I <sup>131</sup>	от 3,7 до $3,7 \cdot 10^6$ , Бк/м <sup>3</sup> (в спектре излучения I131)	$\pm 30$
ОА радиоактивных аэрозолей	по альфа-излучению: от $1,0 \cdot 10^{-2}$ до $2,0 \cdot 10^5$ , Бк/м <sup>3</sup> (от 3,0 до 8,0, МэВ); по бета-излучению: от $1,0 \cdot 10^{-1}$ до $1,0 \cdot 10^6$ , Бк/м <sup>3</sup> (от 3,0 до 8,0, МэВ)	$\pm 30$
ОА ИРГ	от $1,0 \cdot 10^4$ до $1,0 \cdot 10^{13}$ , Бк/м <sup>3</sup> (от 0,06 до 3,0, МэВ)	$\pm 20$
ОА жидкости (бесконтактный вариант)	от $1,5 \cdot 10^3$ до $3,7 \cdot 10^8$ , Бк/м <sup>3</sup> (от 0,05 до 7,2, МэВ)	$\pm 20$
АО жидкости (проточный вариант)	от $2,5 \cdot 10^3$ до $3,7 \cdot 10^8$ , Бк/м <sup>3</sup> (от 0,1 до 3,0, МэВ)	$\pm 30$
АО жидкости (погружной вариант)	от $3,7 \cdot 10^3$ до $4,0 \cdot 10^8$ , Бк/м <sup>3</sup> (от 0,15 до 1,5, МэВ)	$\pm 20$
ОА N <sup>16</sup>	от $1,5 \cdot 10^3$ до $3,7 \cdot 10^8$ , Бк/м <sup>3</sup> (от 0,05 до 7,2, МэВ)	$\pm 30$
ОА Na <sup>24</sup> в солевом остатке	от $5,0 \cdot 10^3$ до $1,0 \cdot 10^{10}$ , Бк/м <sup>3</sup> (в спектре излучения Na <sup>24</sup> )	$\pm 30$
Индивидуальный эквивалент дозы	от $5,0 \cdot 10^{-5}$ до $1,0 \cdot 10^1$ , Зв (рентгеновское и гамма-излучение от 0,015 до 7,0, МэВ)	$\pm 15$
Плотность потока бета-частиц с поверхности	от $1,0 \cdot 10^0$ до $1,5 \cdot 10^4$ , част.·см <sup>-2</sup> ·мин <sup>-1</sup> (от 0,1 до 2,5, МэВ)	$\pm 30$

**Список литературы**

1. Нововоронежская АЭС-2. Частное техническое задание на разработку АСРК 590 85 090.33533.033-Ф.АСРК. ЧТЗ.М.
2. АЭС «Руппур». Энергоблоки 1,2. АСРК. Частное техническое задание на разработку RPR.1022.10JA.CFL. АТ.ЕС0001.
3. АЭС «Аккую». Энергоблоки 1,2,3,4. АСРК. Частное техническое задание на разработку AKU.1022.0.0.АК. ВD0023.
4. Курская АЭС-2. Энергоблоки 1, 2. АСУ ТП. АСРК. Частное техническое задание. KUR.1022.UJA.CFM.EEC0023.
5. Системы радиационного контроля атомных электростанций. Общие требования. СТО 1.1.1.04.001.1384-2017.



## Комплекс для исследования процессов в области физики разряда и его применение

к.т.н. **С.Г. Давыдов**, д.ф.-м.н. А.Н. Долгов, А.А. Козлов,  
к.т.н. В.О. Ревазов, к.т.н. Р.Х. Якубов

ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова» – Москва, Россия

Представлен многофункциональный исследовательский комплекс, разработанный для получения основополагающих знаний в области физики разряда по поверхности диэлектрика, в вакуумных и газовых промежутках, изучения свойств плазмы вакуумных дуг в парах металла и свойств лазерной плазмы с применением различных методик.

## Complex for Research of Processes in the Field of Discharge Physics and its Application

PhD **S.G. Davydov**, Dr. A.N. Dolgov, A.A. Kozlov, PhD V.A. Revazov, PhD R.Kh. Yakubov

FSUE Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA) – Moscow, Russia

The multifunctional research complex is presented, designed to obtain fundamental knowledge in the field of physics of discharge on the dielectric surface, in vacuum and gas gaps, to study the plasma properties of vacuum arcs in metal vapors and the properties of laser plasma using various techniques.

### Введение

Для детального рассмотрения и понимания особенностей развития высоковольтного сильноточного разряда в вакуумных и газонаполненных промежутках, в том числе при его иницировании вспомогательным искровым разрядом или лазерным излучением, во ФГУП «ВНИИА» разработан и создан многофункциональный исследовательский комплекс, позволяющий проводить исследования плазмы [1–4] с применением следующих методик:

- регистрация с наносекундным временным разрешением изображений исследуемого объекта методами импульсной тенеграфии и интерферометрии, получаемых с помощью лазерного осветителя (импульсного диагностического лазера);
- регистрация изображений, получаемых методами скоростной фотографии оптического диапазона в собственном излучении исследуемого объекта с помощью электронно-оптического преобразователя с наносекундным временным разрешением;
- регистрация и анализ визуальных изображений исследуемого объекта в инфракрасном диапазоне его собственного излучения с помощью тепловизора-пирометра;
- определение параметров плазмы (электронной температуры, концентрации электронов и ионов) разряда с помощью зондовых измерений путем анализа вольтамперных характеристик;
- определение параметров корпускулярной эмиссии с помощью электростатических и магнитных анализаторов энергетического и зарядового состава корпускулярных потоков;
- регистрация импульсов электромагнитного излучения в широком спектральном диапазоне (инфракрасный, оптический и ультрафиолетовый диапазон спектра).

### Исследовательский комплекс

Комплекс обладает гибкой аддитивной архитектурой аппаратурной части, допускающей дальнейшее развитие в целях решения возникающих задач.

Вакуумная часть комплекса состоит из набора вакуумных камер с системой средств вакуумной откачки (форвакуумного и турбомолекулярного насосов для получения безмаслянного вакуума до уровня  $10^{-4}$  Па), вакуумных вентилях, средств контроля вакуума, системы высоковольтных и низковольтных вводов, набора диагностических окон. Размещается на оптическом столе (2 500 × 1 500 мм) и на вспомогательной стойке, примыкающей к оптическому столу.

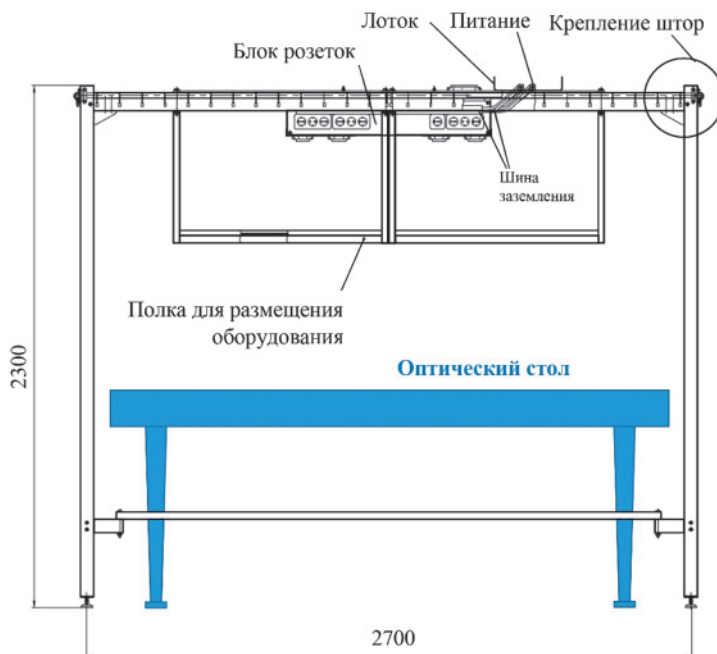


Рис. 1. Общая пространственная структура приспособлений для размещения оборудования и аппаратуры частей комплекса

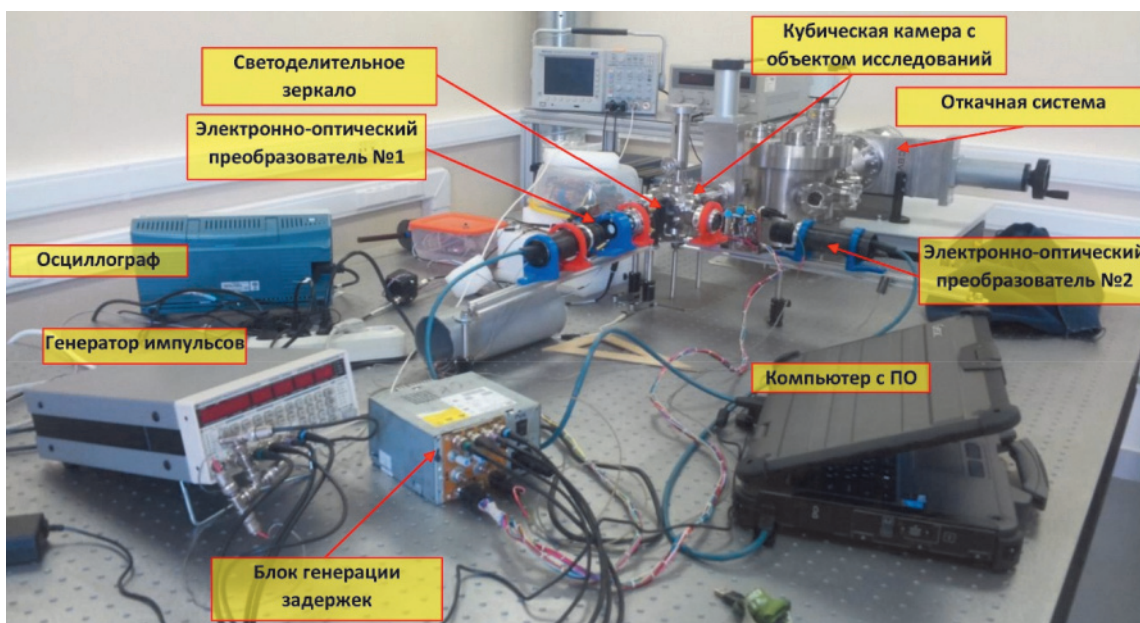


Рис. 2. Аппаратурный модуль для проведения скоростной фотографии

Электрическая часть комплекса, состоящая из высоковольтных источников напряжения для питания электрических схем, источников высокого и низкого напряжения для средств диагностики, набора средств измерений и контроля электрических параметров цепей, размещается на полке для оборудования.

### **Обзор результатов исследований физических процессов, протекающих в устройствах плазменной электроники**

Создание комплекса открыло широкие возможности для макетирования разрабатываемых приборов и изучения характеристик экспериментальных образцов. Ряд полученных с его использованием научно-технических результатов имеет важное прикладное значение для разработки перспективных образцов разрабатываемых приборов. В их числе можно указать следующие.

Обнаружено решающее влияние на скорость коммутации короткого вакуумного промежутка явления ионизации остаточного газа под действием эмиссии излучения и электронов из плазмы искрового разряда или лазерной плазмы при инициировании процесса коммутации в вакууме  $10^0$ – $10^{-2}$  Па.

Проведена расчетная и экспериментальная оценка энергии иницирующего искрового разряда, необходимой для обеспечения стабильности процесса коммутации короткого вакуумного промежутка. Экспериментально изучена зависимость времени задержки процесса коммутации от давления остаточного газа и энергии иницирующего искрового разряда по поверхности диэлектрика.

Обнаружены качественные различия характера развития искрового разряда в вакууме по поверхности диэлектриков, отличающихся термостойкостью.

Экспериментально показано влияние осевой симметрии миниатюрных электроразрядных коммутаторов на надежность их функционирования.

На основе полученных научных результатов предложены и опробованы на экспериментальных образцах новые методы повышения эксплуатационных характеристик миниатюрных электроразрядных коммутаторов с инициированием вспомогательным искровым разрядом и лазерным излучением.

Можно отметить, что был получен ряд научных результатов, в первую очередь, в области физики плазмы, имеющих фундаментальное значение.

Путем измерения с высоким временным разрешением токов, протекающих в коротком ( $\sim 1$  мм) вакуумном промежутке, и падения напряжения на нем, при относительно невысоких напряжениях источника тока (не более 3 кВ) удалось зарегистрировать пучки электронов и ионов, эмитируемые из катодного пятна искрового разряда, и зафиксировать процесс распространения плазмы.

При использовании зондовой методики была показана техническая возможность изучения с ее помощью быстропротекающих процессов (наносекундного временного масштаба), что до настоящего времени полагали невозможным (считается, что доступен временной масштаб  $\sim 1$  мкс).

Обнаружена возможность возникновения центра взрывной эмиссии электронов, т.е. элемента катодного пятна, при протекании в вакууме тлеющего разряда с током меньше критического ( $I_{мл} = 0,1 \text{ A} < I_{кр} = 1^{-3} \text{ A}$ ).

Обнаружена анизотропия по флюэнсу и электронной температуре потока плазмы, эмитированного из искрового разряда по поверхности диэлектрика.

### **Заключение**

Представленный комплекс открывает возможности поиска новых конструктивных и технологических решений для совершенствования современных и разработки перспективных приборов плазменной электроники.

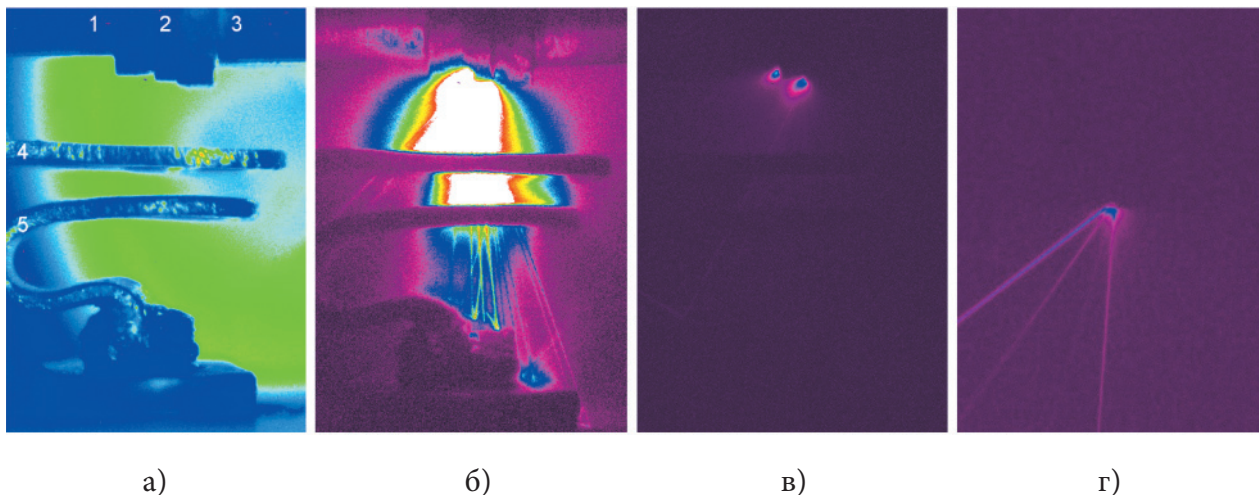


Рис. 3. Фотографии, полученные с помощью скоростной видеокамеры:  
 а) вид макета миниатюрного коммутатора с двойным катодом и искровым поджигом:  
 1 – катод №1, 2 – диэлектрическая вставка (керамика), 3 – управляющий электрод, 4 – катод №2, 5 – анод;  
 б) разряд (дуговой) при положительной полярности потенциала анода (+100 В);  
 в) разряд по поверхности керамики (только искровой в узле поджига) при отрицательной полярности потенциала анода (-100 В), наблюдается испарение материала электродов (анодный и катодный факелы);  
 г) искровой разряд по поверхности слюды в узле поджига, наблюдаются откольные явления и испарение материала диэлектрика.  
 Экспозиция–60 мкс [3, 4]

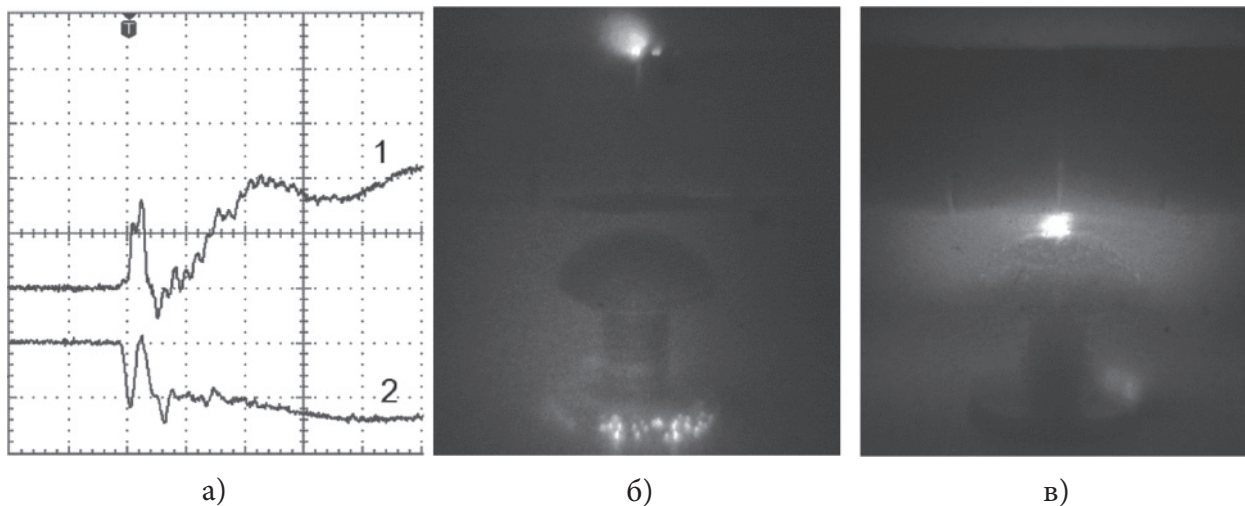


Рис. 4. а) Осциллограммы тока (1) и напряжения (2) разряда в коротком вакуумном промежутке ( $U_{нач} = 2$  кВ,  $I_{макс} = 100$  А, развертка – 100 нс/дел.);  
 фотографии: б) разряд в вакуумном промежутке на искровой стадии – наблюдаются анодные пятна на основании анода (внизу), а также катодный факел и анодное пятно вспомогательного искрового разряда по поверхности диэлектрика (вверху);  
 в) разряд на стадии дуги.  
 Экспозиция–100 нс [1]



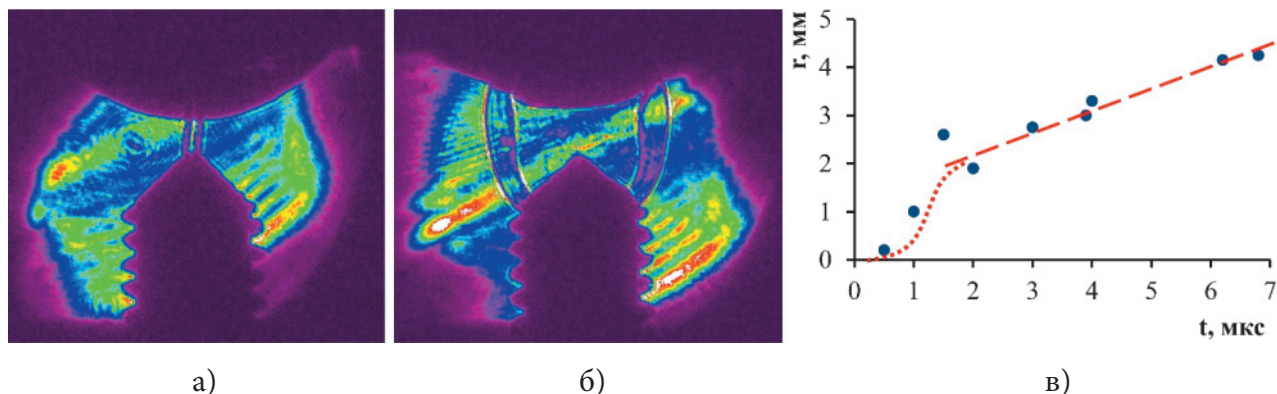


Рис. 5. Теневые изображения разряда в коротком газовом промежутке:  
 а) фаза формирования канала тока;  
 б) фаза отрыва ударной волны (УВ) от канала тока;  
 в) график зависимости смещения УВ от времени с момента старта разряда

### Список литературы

1. С.Г. Давыдов, А.Н. Долгов, М.А. Карпов, А.В. Корнеев, Д.В. Никишин, А.А. Пшеничный, Р. Х. Якубов. Пространственная структура и динамика импульсного дугового разряда в вакууме // Успехи прикладной физики. – 2019. – Т. 7(5). – С. 454–462.
2. С.Г. Давыдов, А.Н. Долгов, А.С. Каторов, В.О. Ревазов, Р.Х. Якубов. Исследование лазерной плазмы в среде разреженного газа с использованием одиночного электростатического зонда // Журнал технической физики. – 2020. – Т. 90(6). – С. 919–924.
3. С.Г. Давыдов, А.Н. Долгов, А.А. Козлов, Р.Х. Якубов. Исследования механизма коммутации короткого вакуумного промежутка с помощью вспомогательного искрового разряда // Журнал технической физики. – 2021. – Т. 91(12). – С. 1916–1921.
4. S.G. Davydov, A.N. Dolgov, A.A. Kozlov, V.A. Maksimov, R.Kh. Yakubov. Optical diagnostics of a dielectric surface discharge in the rigged vacuum gap using various dielectric materials. – Journal of Physics: Conference Series. 2021. Ser. 2059 012006. P. 1–5.



## Применение сцинтиллятора ZnS+LiF для построения детекторов тепловых нейтронов

к.ф.-м.н. С.В. Колесников, к.ф.-м.н. Е.В. Рябева, к.ф.-м.н. Н.В. Бойко,  
**А.П. Денисенко**, С.Г. Рудаков, А.Н. Шарифбаев, И.С. Левцов

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ – Москва, Россия

Проведены исследования по определению ряда характеристик сцинтиллятора ZnS(Ag)+<sup>6</sup>LiF с целью применения данного типа сцинтилляторов в качестве альтернативы гелиевым счетчикам и дальнейшего применения их для построения ядерно-физической аппаратуры. Регистрация сигнала осуществлялась с помощью пластикового световода и кремниевых фотоумножителей. Продемонстрирована возможность разделения сигналов от гамма-излучения и тепловых нейтронов по амплитуде.

## Application of the ZnS+LiF Scintillator for the Development of Thermal Neutron Detectors

PhD S.V. Kolesnikov, PhD E.V. Ryabeva, PhD N.V. Boyko,  
**A.P. Denisenko**, S.G. Rydakov, A.N. Sharifbaev, I.S. Levtsov

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute) – Moscow, Russia

Investigation into characteristics of the ZnS(Ag)+<sup>6</sup>LiF scintillator was carried out in order to use this type of scintillators as an alternative to helium counters and their further application for the development of nuclear physics equipment. The signals were recorded using a plastic light guide and silicon photomultipliers. The possibility of separating signals from gamma radiation and thermal neutrons by amplitude is demonstrated.

### Введение

Регистрация тепловых нейтронов происходит, как правило, за счет реакции поглощения нейтрона ядром с последующим испусканием заряженных частиц. Некоторые изотопы имеют большое сечение поглощения тепловых нейтронов, а значит могут использоваться в качестве конверторов при регистрации тепловых нейтронов. К подобным изотопам относятся <sup>3</sup>He, <sup>6</sup>Li, <sup>10</sup>B, <sup>155</sup>Gd, <sup>157</sup>Gd.

Широкое распространение получил <sup>3</sup>He, который используется в качестве газа-наполнителя в пропорциональных счетчиках. Регистрация нейтронов основана на реакции:



<sup>3</sup>He отличается от других изотопов высокой эффективностью регистрации нейтронов (60-90%), нечувствительностью к  $\gamma$ -излучению. Однако на данный момент изотоп является дефицитным и дорогостоящим, и этот факт способствует поиску альтернативного материала. Данная работа посвящена исследованию возможности применения в качестве подобной альтернативы сцинтиллятора ZnS(Ag)+<sup>6</sup>LiF.

### Сцинтиллятор ZnS(Ag)+<sup>6</sup>LiF

Сцинтиллятор представляет собой смесь гранул <sup>6</sup>LiF (обогащение по <sup>6</sup>Li от 80 до 95%) и ZnS(Ag). Массовое соотношение <sup>6</sup>LiF:ZnS(Ag) сцинтиллятора, используемого в данной работе, составляет 1:4 с обогащением по <sup>6</sup>Li – 95%.

Принцип работы сцинтилляторов, содержащих <sup>6</sup>Li, основан на реакции [1]:



Образующиеся в результате реакции альфа-частица и тритон с суммарной кинетической энергией 4,8 МэВ разлетаются в противоположные стороны и вызывают ионизацию молекул ZnS(Ag) с последующим испусканием фотонов с длиной волны 450 нм. При поглощении одного теплового нейтрона испускается  $1,6 \times 10^5$  фотонов, световыход от альфа-частицы составляет при этом  $5,5 \times 10^5$  фотон/МэВ [2].

Основные характеристики сцинтиллятора представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики <sup>6</sup>LiF:ZnS(Ag)

Массовое отношение <sup>6</sup> LiF:ZnS(Ag)	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$d$ , мм	$Z_{эфф}$	$\tau$ , нс	$\lambda$ , нм	Световыход, фотон/т. нейтрон	Конверсионная эффективность
1:4	4,1	0,5	27	4; 200	450	$1,6 \cdot 10^5$	20–25%

Пробег альфа-частицы и тритона в сцинтилляторе составляет приблизительно 7 мкм [1]. Учитывая это, а также тот факт, что сцинтиллятор практически непрозрачен по отношению к собственному излучению (показатели преломления равны 2,4 и 1,3 для ZnS(Ag) и <sup>6</sup>LiF, соответственно), сбор света и регистрация нейтрона сильно зависят от места взаимодействия нейтрона с <sup>6</sup>Li. Как правило, это происходит, в основном, в поверхностном слое сцинтиллятора, поэтому большая часть фотонов не достигает фоторегистратора. Данную проблему частично решают внедрение между слоями сцинтиллятора световодов или WLS-волокон, уменьшение толщины сцинтиллятора, увеличение чувствительной площади и увеличение количества слоев [3–5].

Отличительной особенностью ZnS(Ag) является низкая чувствительность к гамма-излучению (электронам), что обусловлено  $\alpha/\beta$ -отношением для альфа-частиц  $\sim 1$  [6] и небольшой толщиной сцинтиллятора.

Константа затухания составляет от 3 до 5 нс (для электронов) и от 100 до 250 нс (для  $\alpha$ -частиц) [7]. Разница в амплитуде и времени затухания сцинтилляций позволяет разделять импульсы от нейтронов и гамма-квантов.

### Экспериментальный стенд

Для отработки технических решений и определения характеристик измерительного тракта был собран стенд, состоящий из тонкой пленки ZnS(Ag)+<sup>6</sup>LiF толщиной 0,5 мм, приклеенной на одну из граней прямоугольного светопровода из оргстекла (из акрила), размеры которого составляют  $6 \times 6 \times 100$  мм. Сбор света осуществляется с боковой грани светопровода с помощью SiPM MICROFC-60035-SMT (размерами  $6 \times 6$  мм).

Сигнал снимался с медленного выхода SiPM и усиливался с помощью предварительного усилителя, после чего подавался на осциллограф или цифровой дигитайзер CAEN DT5730B.



Рис. 1. Конструкция детектора: 1 – светозащитное покрытие; 2 – тефлоновое покрытие; 3 – светопровод из оргстекла; 4 – SiPM; 5 – ZnS:Ag+<sup>6</sup>LiF

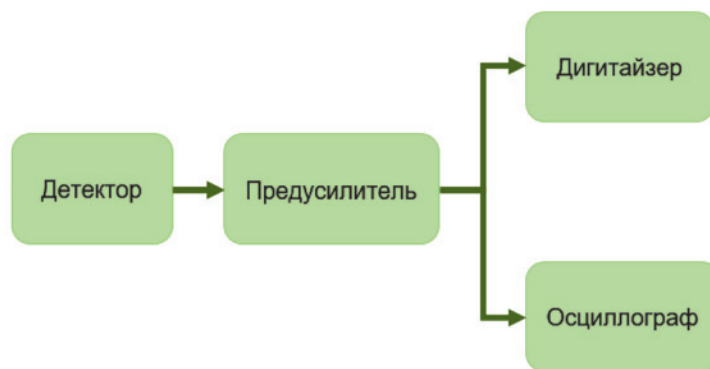


Рис. 2. Блок-схема экспериментального стенда

Целью данных исследований было определение реальных характеристик получаемого сигнала и возможность разделения сигналов, получаемых от гамма- и нейтронного излучения. Источник излучения располагался на поверхности светопровода со стороны сцинтиллятора. Вся конструкция размещалась в светонепроницаемом чехле.

Гамма-кванты так же, как и нейтроны, регистрируются в сцинтилляторе за счет вторичного излучения – электронов, которые возникают в ходе взаимодействия гамма-квантов с веществом сцинтиллятора. В качестве источника электронов использовался источник <sup>90</sup>Sr–<sup>90</sup>Y с максимальной энергией 2,27 МэВ.

Формирование потока тепловых нейтронов осуществлялось с помощью источника <sup>238</sup>PuBe, помещенного в полиэтиленовый контейнер с толщиной стенки 10 см.

Амплитуды сигналов составили 20 мВ и 512 мВ для электрона (рис. 3) и теплового нейтрона (рис. 4), соответственно. Отношение амплитуд отличается более чем на порядок, что позволяет легко разделить сигналы по амплитуде. Длительность подъема и спада электронного события составила ~30 нс и ~100 нс. Форма сигнала, полученная в ходе регистрации теплового нейтрона, имеет большое количество флуктуаций. Длительность подъема и спада импульса от теплового нейтрона составила ~15 нс и ~300 нс. Технически длительность импульса можно уменьшить, снимая сигнал с быстрого выхода SiPM.

В ходе экспериментов с НГ (АИНК) в момент испускания им потока нейтронов порядка 10<sup>8</sup> нейтрон/импульс (длительность нейтронного импульса 5 мкс), постоянно видно влияние рентгеновского излучения (рис. 5). Эксперимент проводился для 3-х схем. Детектор без защиты, детектор с защитой из свинца 2 мм и детектор с защитой из свинца 2 мм с фильтром из Cd. Во всех случаях сборка была помещена в полиэтиленовый контейнер толщиной 15 см. Расстояние до генератора – 20 см. На графике видно, что в первые 10 мкс наблюдается засветка детектора без защиты. На двух других графиках такой засветки нет, присутствуют импульсы от регистрации тепловых нейтронов. К сожалению, интенсивность рентгеновского излучения

в момент импульса измерить не удалось. В то же время размещение вплотную источника  $^{137}\text{Cs}$  интенсивностью  $10^5$  Бк не дало изменение скорости счета фона. Что вполне закономерно, так как максимально возможная энергия электрона, возникающего в сцинтилляторе, не превышает 661,66 кэВ, что меньше энергии используемого нами источника электронов, а эффективность регистрации составляет  $10^{-6}$  [8].

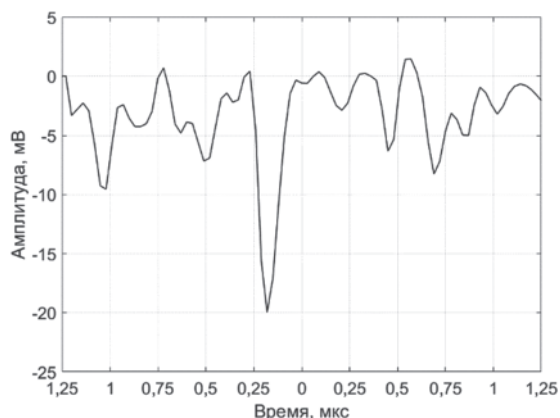


Рис. 3. Импульс от электрона

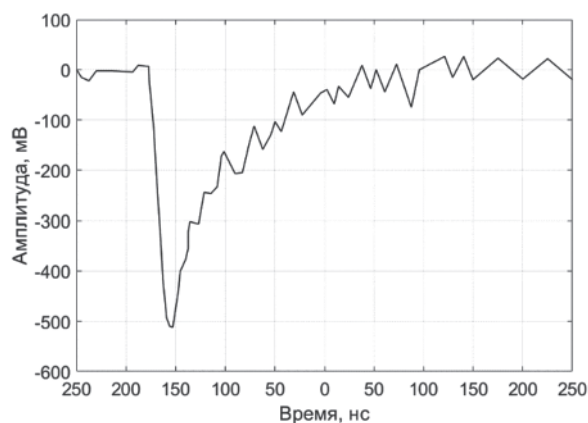


Рис. 4. Импульс от теплового нейтрона

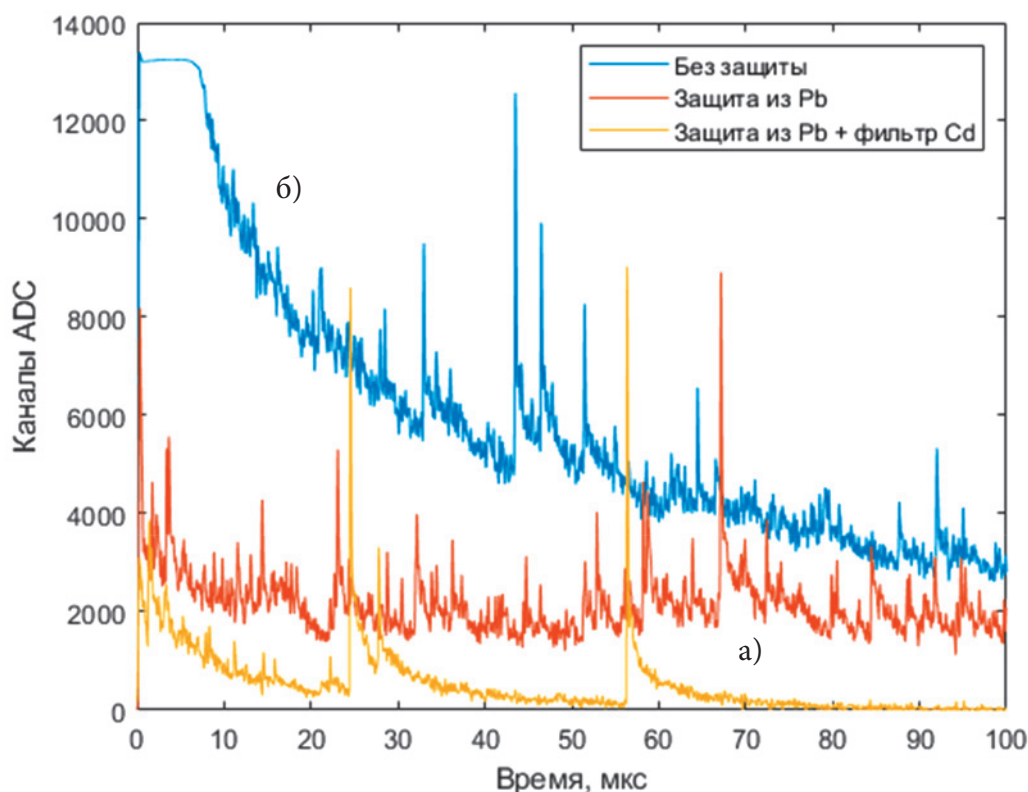


Рис. 5. Запуски НГ: а) между детектором и НГ пластины из свинца и кадмия; б) без пластин

### Заключение

Проведенный анализ показал, что при использовании сцинтиллятора  $\text{ZnS:Ag} + {}^6\text{LiF}$  разделение гамма- и нейтронных событий (если нет необходимости фиксировать события по гамма-каналу) можно успешно осуществлять за счет дискриминации сигнала по амплитуде. Регистрация событий гамма-излучения этим сцинтиллятором малоэффективна, так как эффективность регистрации составляет  $10^{-6}$ .

### Список литературы

1. V.S. Litvin et al. ZnS(Ag)/<sup>6</sup>LiF and LiI(Eu) scintillators and silicon photomultipliers for thermal neutron detectors with high space and time resolution // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2009. – Т. 73. – №2. – С. 219–221.
2. A. Osovizky et al. <sup>6</sup>LiF:ZnS(Ag) mixture optimization for a highly efficient ultrathin cold neutron detector // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2018. – Т. 65. – №4. – С. 1025–1032.
3. K. Pritchard et al. <sup>6</sup>LiF:ZnS(Ag) neutron detector performance optimized using waveform recordings and ROC curves // IEEE transactions on nuclear science. – 2019. – Т. 67. – №1. – С. 414–421.
4. K. Pritchard et al. Cold neutron radiation dose effects on a <sup>6</sup>LiF:ZnS(Ag) neutron detector with wavelength shifting fibers and SiPM photodetector // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2021. – Т. 986. – С. 1–4.
5. A. Stoykov, J.B. Mosset, M. Hildebrandt. Evaluation of a ZnS:<sup>6</sup>LiF based scintillation neutron detector at high counting rates // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2019. – Т. 936. – С. 34–35.
6. И. Гулаков. Регистрация ионизирующих излучений. – Litres, 2022.
7. F. Pino et al. Study of the thermal neutron detector ZnS (Ag)/LiF response using digital pulse processing // Journal of Instrumentation. – 2015. – Т. 10. – №08. – С. 1–14.
8. V.N. Marin et al. A new type of thermal-neutron detector based on ZnS(Ag)/LiF scintillator and avalanche photodiodes // Technical Physics Letters. – 2015. – Т. 41. – №9. – С. 912–914.



## **Развитие методов математического моделирования при разработке изделий ядерного приборостроения - актуальные задачи и особенности применения**

**М.Д. Дерябина**, А.А. Королёв, Р.М. Лёвин, С.В. Ткачёв, д.т.н. С.Б. Чебышов, И.И. Черкашин

АО «СНИИП» - Москва, Россия

В докладе рассматривается подход АО «СНИИП» в развитии одного из наиболее актуальных направлений ядерного приборостроения – цифровизации процессов создания приборов, комплексов и систем: от этапов исследований и разработки до процедур испытаний оборудования.

## **Application of Mathematical Modeling Methods in the Development of Nuclear Instrumentation Products - Current Tasks and Application Features**

**M.D. Deryabina**, A.A. Korolyov, R.M. Lyovin, S.V. Tkachov, Dr. S.B. Chebyshov, I.I. Cherkashin

JSC "SNIIP" - Moscow, Russia

The report discusses an approach to the development of one of the most relevant areas of nuclear instrumentation – the digitalization of the processes of creating instruments, complexes and systems: from research and development stages to equipment testing procedures.

Повышение нормативных и проектных требований к метрологическим характеристикам приборов, систем и комплексов в ядерном приборостроении и ужесточение требований к их устойчивости к внешним воздействующим факторам, с одной стороны, в совокупности с необходимостью создания оборудования в условиях ограниченных финансовых и временных возможностей, а также в условиях ограниченных практических возможностей выполнения НИОКР по традиционной схеме, с другой стороны, усложняют задачи разработки новой техники, создавая риски невыполнения договорных обязательств и снижения качества и надежности выпускаемой продукции.

Наиболее современным способом разрешения вышеописанной потенциально возможной критической ситуации является развитие комплексной технологии цифровизации процесса создания приборной продукции:

- моделирование процессов взаимодействия ионизирующего излучения с веществом детектора с учетом особенностей геометрии измерений;
- разработка алгоритмов математической обработки сигналов от детекторов ионизирующих излучений, в т.ч. с целью анализа процессов «наложения» сигналов, селекции отклика детектора на фоновое излучение и др.;
- моделирование и расчет испытаний детекторов ИИ;
- моделирование работы приборов в условиях внешнего электромагнитного воздействия (ЕМИ / ЕМС) и анализ конструкторских решений по обеспечению устойчивости к нему;
- схемотехническое моделирование работы электронных устройств;
- моделирование гидродинамических и газодинамических процессов в пробоотборных трактах и конструкции БД, предназначенных для измерения радиоактивности жидких и газовых сред;

- моделирование работы устройства в условиях воздействия внешних воздействующих факторов (температура, влажность, вибрация);
- моделирование надежности и пожаробезопасности изделий с целью автоматизированного расчета соответствующих характеристик;
- применение инструментальных средств для разработки и тестирования специализированного, технологического и системного ПО;
- применение систем автоматизированного проектирования КД в формате 3D с проверкой собираемости и разработкой интерактивной ЭКД;
- применение специализированных электротехнических САПР для разработки схем электрических и 3D-моделей плат и узлов.

Далее в статье будет обзорно рассмотрен опыт АО «СНИИП» в применении методов математического моделирования на различных стадиях разработки устройств детектирования объёмной активности жидких сред проточного типа, в том числе с функцией спектрометрии.

### **Моделирование взаимодействия ионизирующего излучения с веществом детектора при разработке УДЖГ-44Р**

Разработка современной спектрометрической аппаратуры предполагает создание компактных, эргономичных устройств, обеспечивающих выполнение измерений в широком диапазоне (до 10-ти порядков) с низкой погрешностью. Решение обозначенной задачи возможно с помощью определения оптимальной геометрии измерений (формы и размеров измерительной камеры, типа и размера чувствительного элемента блока детектирования, материала и толщины защиты и др.), обеспечивающей максимальную точность измерений. В настоящий момент в АО «СНИИП» развивается направление теоретических расчётов оптимальных параметров устройств детектирования путём математического моделирования в специализированном программном пакете «МСС МТ», предназначенном для имитационного трехмерного моделирования процессов переноса и регистрации ионизирующих излучений методом Монте-Карло.

На этапе теоретических расчётов геометрии избирательного радиометра ОА  $^{24}\text{Na}$  в жидких средах УДЖГ-44Р было проведено моделирование эффективности регистрации гамма-излучения радионуклида  $^{24}\text{Na}$  при помощи сцинтилляционных блоков детектирования на основе кристаллов CsI(Tl) различных размеров от объёмного жидкостного источника в геометрии Маринелли. Математический расчёт с помощью программного обеспечения «МСС МТ» позволил решить задачу выбора оптимальной геометрии измерений при варьировании трех независимых переменных: материала детектора (изменение плотности чувствительного элемента), объёма детектора и объёма измерительной камеры.

В процессе моделирования были последовательно выполнены следующие этапы:

- построение геометрической модели эксперимента, определение материалов модели, задание характеристик источника ионизирующего излучения;
- симуляция заданного числа событий (распадов в источнике) –  $10^6$ ;
- формирование в модуле «МСС Viewer» расчётной функции отклика детектора с кристаллом CsI(Tl) размером  $63 \times 63$  мм при регистрации гамма-квантов с энергиями 1368 кэВ и 2754 кэВ, возникающих вследствие распада радиоизотопа  $^{24}\text{Na}$  в объёмном источнике;
- задание характеристик реального детектора с кристаллом CsI(Tl) размером  $63 \times 63$  мм, эмуляция спектра, регистрируемого реальным детектором от объёмного источника  $^{24}\text{Na}$ ;
- детальный анализ смоделированного спектра гамма-излучения (2-х линий) от объёмного источника  $^{24}\text{Na}$  в модуле обработчика спектров «ASW 2».

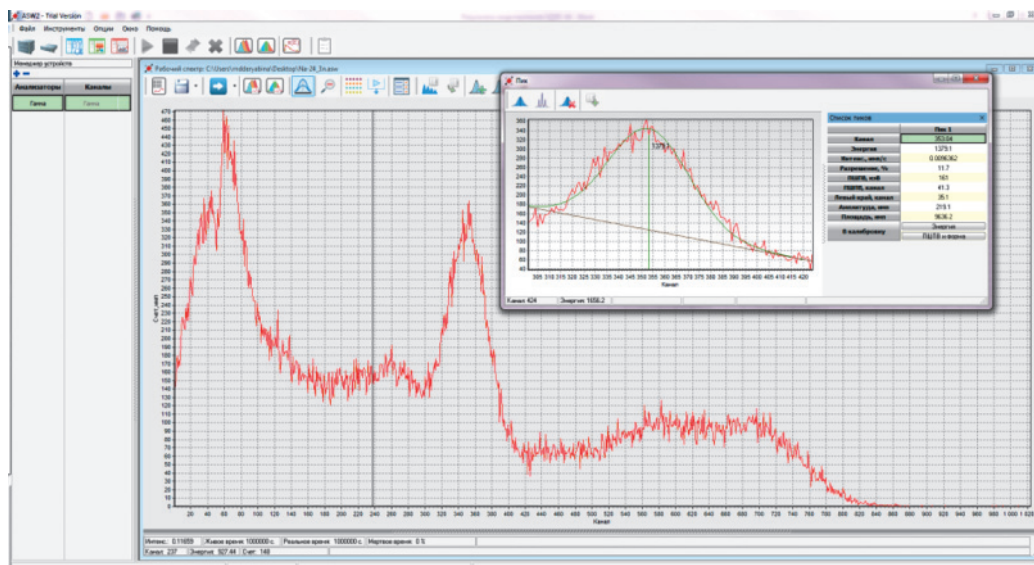


Рис. 1. Детальный анализ смоделированного спектра гамма-излучения от объёмного источника  $^{24}\text{Na}$  в модуле обработчика спектров «ASW2»

Особый практический интерес представляет именно последний этап, позволивший оценить как интегральную загрузку АЦП спектрометра во время снятия спектра выбранным детектором (количество регистрируемых детектором импульсов, определяющих загрузку аналого-цифрового анализатора спектрометра), так и анализ числа импульсов в пике полного поглощения, что, в свою очередь, позволило оценить эффективность регистрации конкретного нуклида и рассчитать допустимый диапазон измерений для избирательного радиометра.

Указанные работы были проведены для оценки эффективности регистрации фотопиков  $^{24}\text{Na}$  с помощью блока детектирования с кристаллом CsI(Tl) из состава УДЖГ-44Р и подтверждения возможности выполнения измерений в диапазоне  $10^3 \text{ Бк/м}^3 - 10^8 \text{ Бк/м}^3$ , в настоящий момент проводятся работы по выбору схемы регистрации  $^{24}\text{Na}$  отдельно от  $^{60}\text{Co}$ , имеющего близлежащий фотопик.

Опыт использования программного пакета «МСС МТ» позволил сделать следующие выводы:

1) математическое моделирование, в отличие от трудоёмкого ручного расчёта, даёт возможность учесть нелинейный характер изменения чувствительности спектрометра при изменении объёма измерительной камеры (учёт влияния конкурирующих процессов: изменение загрузки детектора при увеличении/уменьшении объёма камеры на фоне возрастания/убывания самопоглощения);

2) моделирование каждого акта взаимодействия излучения с веществом детектора как независимого события делает невозможным оценку нелинейности регистрации излучения при высокой загрузке блока детектирования, т.к. ПО не предусматривает возможность учёта наложения импульсов;

3) отсутствие возможности моделирования оптических эффектов (светосбор в кристаллах сложной формы, поведение оптического потока при применении световода между сцинтилляционным кристаллом и ФЭУ) приводит к необходимости использования дополнительных пакетов оптического моделирования для оценки технической конверсионной эффективности;

4) наиболее интересными для разработчика применениями являются возможность сравнения эффективности регистрации излучения различными сцинтилляционными кристаллами, определение теоретической функции отклика детектора, автоматизированный расчёт энергетического разрешения детектора без необходимости покупки дорогостоящих комплектующих.

### **Моделирование гидродинамических и газодинамических процессов в измерительном тракте устройств типа УДЖГ**

Для повышения точности радиометрических и, в особенности, спектрометрических измерений необходимо минимизировать величину, а значит и влияние на результат, собственного фона устройства, что в случае разработки устройства контроля радионуклидного состава жидких сред проточного типа предполагает создание конструкции измерительной камеры, позволяющей минимизировать количество радиоактивных продуктов коррозии, осаждаемых на её дне в процессе движения измеряемой среды. В настоящее время конструкторским отделом АО «СНИИП» в программном пакете SolidWorks Flow Simulation выполнено моделирование конструкции измерительной камеры проточного типа в геометрии сосуда Маринелли, применяемой в жидкостных радиометрах и спектрометрах, с целью определения оптимального расположения патрубков, обеспечивающего равномерное движение среды в измерительной камере. Снижение турбулентного перемешивания жидкости в измерительном тракте, являющегося основной причиной осаждения активированных продуктов коррозии в камере, обеспечивает возможность проведения низкофонных измерений (от 1 Бк/л) в радиометрическом и спектрометрическом режимах.

В результате моделирования с учетом вышезаданных условий была определена оптимальная геометрия расположения патрубков подвода/отвода измеряемой среды от измерительной камеры в геометрии сосуда Маринелли, предполагающая их размещение на диаметрально противоположных сторонах камеры на определенных высотах. В настоящий момент опытный образец усовершенствованной проточной измерительной камеры находится на стадии изготовления, после чего планируется проведение натурных гидродинамических и метрологических испытаний со спектрометрическими и радиометрическими блоками детектирования для проверки гипотезы о снижении интенсивности процесса осаждения радиоактивных продуктов коррозии в камере предварительно смоделированной геометрии.

Следует отметить, что для данной задачи наиболее перспективным с конструкторской точки зрения является применение комплексных САПР: использование САД-систем с интегрированными САЕ-модулями (расчёты тепловых, прочностных, надёжностных, динамических характеристик). Применение комплексных САПР, позволяющих проводить расчёты и разрабатывать конструкторскую документацию, используя одну и ту же модель устройства, существенно сокращает время создания технических средств. Также следует заметить, что функциональность отечественных САПР с модулями САЕ на сегодняшний день уступает иностранным аналогам как по количеству возможных для моделирования воздействующих факторов, так и по эргономичности интерфейса и времени выполнения расчётов.

### **Конечно-элементное моделирование для анализа сейсмостойкости устройств типа УДЖГ**

Одним из проектных требований к оборудованию АСРК строящихся АЭС является проверка сейсмостойкости и устойчивости к воздействиям от удара падающего самолета и воздушной ударной волны. Учитывая невозможность проведения натурных испытаний, обусловленную традиционной технической сложностью в создании на вибростенде воздействий, имитирующих сейсмические нагрузки в низкочастотном диапазоне до 10 Гц, а также ограничениями вибростенда по массогабаритным возможностям испытания технических средств, в АО «СНИИП» было принято решение о развитии направления конечно-элементного моделирования с помощью отечественного ПО ARM Structure 3D (НТЦ «АПМ») для расчёта динамических и прочностных характеристик конструкции устройств контроля объемной активности жидких сред проточного типа.

Методом конечно-элементного моделирования реализована расчетно-экспериментальная оценка сейсмостойкости УДЖГ-35Р с вычислением частот собственных колебаний, что играет ключевую роль в условиях невозможности проведения натурных испытаний. Исключительную роль описанный способ моделирования играет в условиях необходимости подтверждения устойчивости оборудования к критическим воздействиям: падению самолета и воздействию воздушной ударной волны.



## **Особенности разработки технологических спектрометров для измерения объёмной активности ИРГ и жидких сред с применением сцинтилляционных детекторов**

**М.Д. Дерябина**, М.Л. Гаврилюк, А.А. Иванов, И.В. Петрова, А.А. Королёв, Н.Е. Плахин

АО «СНИИП» – Москва, Россия

В статье приведен обзор инновационных технических решений, реализованных АО «СНИИП» в процессе проектирования спектрометрической аппаратуры в рамках выполнения инвестиционного проекта по совершенствованию линейки технических средств АСРК. В частности, рассмотрены следующие особенности разработки технологических спектрометров:

- 1) применение в составе технологических спектрометров «интеллектуальных» блоков детектирования;
- 2) применение программного пакета «Компас» (АСКОН) при конструировании технологических спектрометров и разработке различных типов схем из комплекта конструкторской документации;
- 3) применение SCADA-системы «Trace mode 6» при создании системы управления пробоотбором технологических спектрометров.

## **Features of the Development of Technological Spectrometers for Measuring the Volumetric Activity of Radioactive Noble Gases and Liquid Media Using Scintillation Detectors**

**M.D. Deryabina**, M.L. Gavriilyuk, A.A. Ivanov, I.V. Petrova, A.A. Korolyov, N.E. Plakhin

JSC "SNIIP" – Moscow, Russia

Currently, within the framework of an investment project to improve the line of ASRK technical equipment, JSC “SNIIP” develops technological spectrometers SEG-01R and SGG-02R for continuous monitoring of the nuclide composition of the reactor core coolant and emissions of IRG into the NPP vent pipe, respectively, and several radiometers with a spectrometry function. The report is devoted to a brief review of innovative technical solutions implemented in the design of spectrometric equipment within the framework of this project:

- 1) the use of intelligent detection units as part of technological spectrometers;
- 2) application of the software package “Compass” (ASCON) in the design of spectrometers and the development of various types of circuits from a set of design documentation (for example, SEG-01R and SGG-02R);
- 3) the use of the SCADA-system “Trace mode 6” for creating a control system of sampling in SEG-01R and SGG-02R.

В целях повышения надежности и безопасности современных АЭС в нормативной и проектной документации атомной отрасли происходит регулярное ужесточение требований к радиационному контролю как с количественной, так и с качественной точек зрения: увеличивается количество каналов контроля и повышаются требования к метрологическим характеристикам аппаратуры измерений ионизирующих излучений. Учитывая описанные выше тенденции, в



АО «СНИИП» в 2020 году был создан и запущен проект по совершенствованию линейки технических средств АСРК (далее – ТС АСРК), предполагающий, в том числе, разработку технологических спектрометров СЕГ-01Р и СГГ-02Р, удовлетворяющих требованиям проектов АСРК АЭС «Руппур», АЭС «Аккую», Курской АЭС-2, строящихся в настоящее время. Спектрометры СЕГ-01Р и СГГ-02Р предназначены для непрерывного автоматизированного измерения объёмной активности реперных радионуклидов  $^{131}\text{I}$ – $^{135}\text{I}$ ,  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{42}\text{K}$  и др. в теплоносителе первого контура реактора и инертных радиоактивных газов  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{87}\text{Kr}$ ,  $^{88}\text{Kr}$ ,  $^{133}\text{Xe}$  и др. в вентри трубе АЭС соответственно (3D-модель представлена на рис. 1а).

### Использование «интеллектуальных» БД в составе СЕГ-01Р и СГГ-02Р

При проектировании СЕГ-01Р и СГГ-02Р разработчиками была поставлена комплексная задача:

- 1) обеспечить повышенные (относительно аналогов) параметры надёжности и устойчивости к внешним воздействующим факторам, учитывая размещение спектрометров в технологических периодически облучаемых помещениях;
- 2) обеспечить метрологические характеристики, позволяющие проводить измерение парциальных активностей реперных радионуклидов;
- 3) обеспечить измерение объёмной активности сред в диапазоне от  $3,7 \cdot 10^2$  до  $3,7 \cdot 10^{12}$  Бк/м<sup>3</sup> в режиме нормальной эксплуатации и с нарушением режима нормальной эксплуатации.

Для выполнения поставленной задачи было принято решение отказаться от применения блоков детектирования (далее – БД) на основе особо чистого германия, требующих осложняющего эксплуатацию азотного или электрического охлаждения, и создать опытный образец спектрометра на базе двухканального сцинтилляционного измерительного тракта (см. рис. 1б).

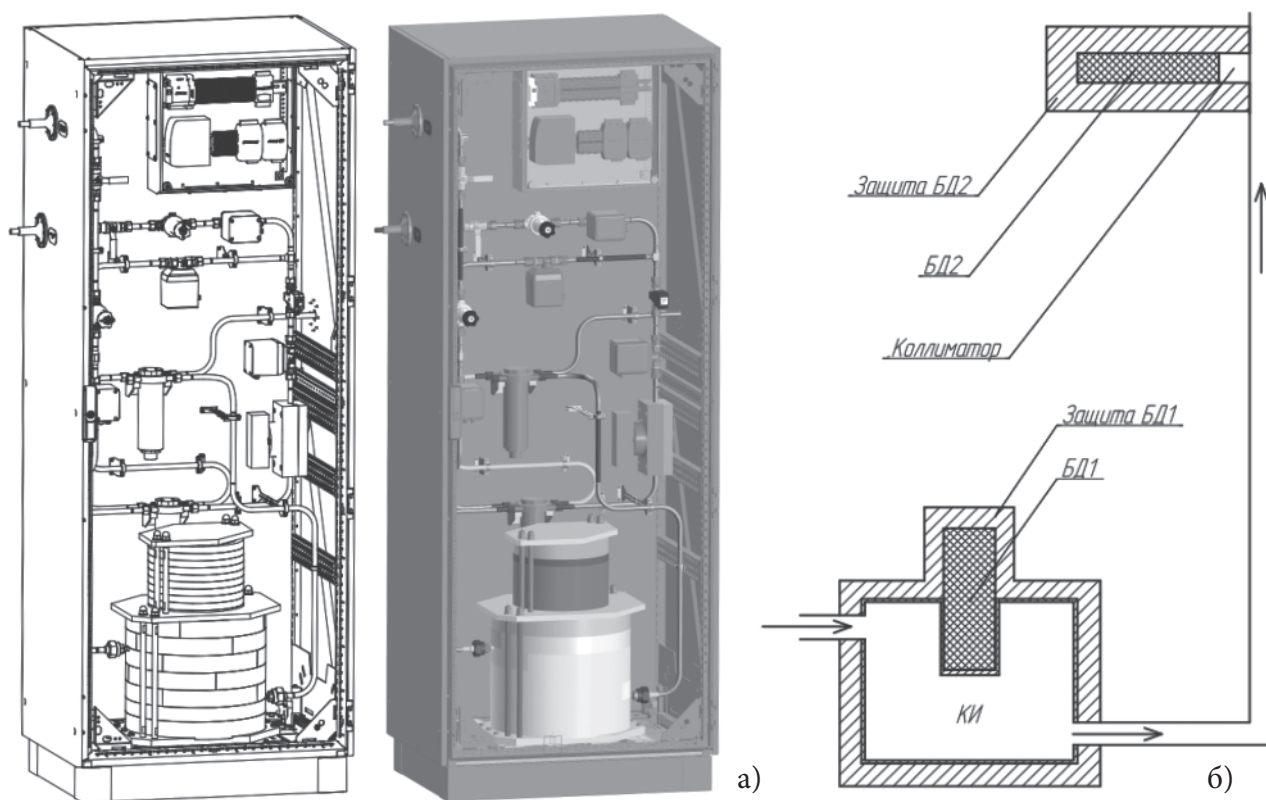


Рис. 1. а) 3D-модель технологических спектрометров в шкафном исполнении; б) структурная гидравлическая схема двухканального измерительного тракта

В СЕГ-01Р измерение малых значений активностей среды должно производиться в геометрии сосуда Маринелли объёмом 3 л при помощи погруженного в него БД со сцинтилляционным кристаллом  $\text{SrI}_2(\text{Eu})$  (далее – БД1) размером 38×38 мм, вакуумным ФЭУ и встроенным многоканальным анализатором (далее – МКА). Выбор кристалла  $\text{SrI}_2(\text{Eu})$  в данном случае обусловлен его уникальными характеристиками: высоким энергетическим разрешением (~2,8% по ППП 662 кэВ Cs-137) и высоким световыходом в сочетании с исключительно высокой линейностью амплитудных характеристик в широком энергетическом диапазоне. Особенно стоит подчеркнуть тот факт, что кристалл  $\text{SrI}_2(\text{Eu})$  обладает наименьшей собственной внутренней активностью среди сцинтилляторов с высоким разрешением, доступных на рынке, что позволит проводить измерения сред с низкой активностью.

Измерение высоких значений активностей среды в СЕГ-01Р должно производиться в приставной (к трубопроводу спектрометра) геометрии при помощи БД со сцинтилляционным кристаллом  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  размером 25×10 мм, вакуумным ФЭУ и встроенным МКА (далее – БД2). Применение вакуумного ФЭУ в комбинации с кристаллом выбранной геометрии, обладающим высоким световыходом, позволило оптимизировать габаритные размеры БД2. Наибольший интерес на данном этапе представляет проверка на опытном образце СЕГ-01Р гипотезы о возможности идентификации близко лежащих пиков изотопов йода в спектре теплоносителя первого контура реактора.

Отличительной особенностью спектрометрического тракта стало применение в его составе «интеллектуальных» БД: МКА, встроенный в состав БД1 и БД2, обеспечил прямую оцифровку импульсных сигналов и последующую их обработку с помощью алгоритмов цифровой обработки сигналов. Таким образом, была обеспечена возможность получения выходного сигнала БД в виде массива цифровых кодов, посредством которых передается амплитудный спектр регистрируемого излучения. Данное техническое решение также позволило минимизировать габаритные размеры спектрометрического тракта и использовать современный комбинированный интерфейс PoE (Power over Ethernet, питание через Ethernet) для питания и подключения БД1 и БД2 к панельному компьютеру, выполняющему обработку спектров.

*Примечание. Спектрометрический тракт для СЕГ-01Р и СГГ-02Р разрабатывается АО «СНИИП» совместно с ООО «Предприятие «Грин Стар Технолоджиз».*

## **Использование программного пакета «Компас» (АСКОН) при разработке СЕГ-01 и СГГ-02Р**

Следуя политике импортозамещения, проводимой в атомной отрасли, в процессе конструирования шкафов измерительных и шкафов управления из состава спектрометров в качестве САПР для разработки схем гидравлических, пневматических и электрических был выбран программный пакет «Компас» (АСКОН). В частности, при проектировании электрической части спектрометров использовался специализированный приборостроительный модуль «Компас-электрик» (далее – КЭ), предназначенный для разработки технических средств АСУ ТП (далее – ТС) в шкафном исполнении с применением проводного монтажа.

По результатам первого масштабного применения в АО «СНИИП» указанной САПР при разработке ТС АСРК были сделаны следующие выводы:

1) построение электрических связей в проекте позволило сформировать математическую модель электрической схемы, что позволило, во-первых, провести самодиагностику модели и выявить ошибки в проекте, а во-вторых, автоматизировать процесс разработки (автоматическая нумерация линий связи, автоматическая нумерация УГО, автоматическое формирование различных надписей и т.д.);

2) наличие библиотеки комплектующих в совокупности с математической моделью электрической схемы существенно упростило формирование перечня элементов, что позволило избежать ошибок при заказе комплектующих для сборки спектрометров;

3) существующие открытые библиотеки электронных моделей для КЭ не содержали специализированных устройств (клапаны электромагнитные, модули цифро-аналогового ввода-вывода, блоки питания, блоки детектирования, Ethernet-коммутаторы). Разработка собственных электронных моделей изделий увеличила время проектирования первого изделия (СГГ-02Р), но позволила существенно сократить время проектирования СЕГ-01Р, построенного на аналогичных комплектующих изделиях;

4) специфический интерфейс САПР требует длительного изучения для создания сложных проектов.

### **Применение SCADA-системы «Trace mode 6» при создании системы управления пробоотбором СЕГ-01Р и СГГ-02Р**

В продолжение тенденции использования импортозамещающего программного обеспечения для различных этапов разработки технических средств АСРК при создании систем управления технологических спектрометров применяется отечественная инструментальная система TRACE MODE® 6 (ООО «АдАстра Рисерч груп»), имеющая многолетний опыт применения в атомной отрасли при создании различных подсистем АСУ ТП. С помощью SCADA-системы TRACE MODE® 6 в настоящее время разработано программное обеспечение (управляющая часть и графический интерфейс пользователя) для системы управления пробоотбором.

С технической точки зрения управление пробоотбором технологических спектрометров представляет из себя распределённую автоматизированную систему в следующей конфигурации:

- 1) полевые устройства: внешние исполнительные механизмы (далее ВИМ) – электромагнитные запорные и регулирующие клапаны, крановые распределители и датчики параметров среды;
- 2) модули распределённого ввода-вывода для выдачи управляющих сигналов на ВИМ и сигнализаторы, а также приёма и первичной обработки сигналов квитирования от ВИМ;
- 3) локальное устройство верхнего уровня в виде сенсорной панели, с помощью которой осуществляется отображение измерительной спектрометрической информации, её передача на верхний уровень АСРК и диспетчерское управление режимами работы спектрометра с помощью системы управления пробоотбором.

К несомненным преимуществам разработки управляющего ПО технологических спектрометров в SCADA-системе TRACE MODE® следует отнести следующие:

- 1) базовая версия интегрированной среды разработки (далее – IDE) бесплатна, входит в реестр отечественного программного обеспечения, имеет сертификат соответствия требованиям ГОСТ 8.654 «Требования к программному обеспечению средств измерений. Основные положения»;
- 2) IDE имеет мониторы реального времени (средства запуска опроса контроллеров) для операционных систем Windows и Linux – принципиальное преимущество кроссплатформенности в условиях ужесточающихся требований к системам безопасности АЭС;
- 3) IDE имеет удобный интерфейс, технологию автопостроения каналов контроля, обширную встроенную библиотеку драйверов для контроллеров, встроенные средства отладки, поддерживает программирование на языках стандарта IEC 61131-3;
- 4) IDE имеет стандартную и расширенную бесплатные библиотеки готовых компонентов и алгоритмов управления гидравлическими и пневматическими трактами (клапаны, сигнализаторы, трубная обвязка), что делает эту среду разработки очень удобной для разработки системы управления жидкостных и газовых спектрометров, включая динамическую графическую оболочку ПО;
- 5) интегрированная среда разработки позволяет постепенно наращивать функциональность АСУ, начиная с простого мониторинга и визуализации технологического процесса, заканчивая реализацией более сложных функций, что позволяет вести разработку поэтапно с последовательным введением в ПО различных функций управления без риска полной потери функциональности.

В настоящий момент разработчики СЕГ-01Р и СГГ-02Р не столкнулись с серьёзными недостатками рассматриваемой IDE, поэтому в дальнейшем планируется реализация ПО системы управления пробоотбором именно в IDE TRACE MODE® 6.

## Проблемные вопросы метрологии ионизирующих излучений

д.т.н. С.Б. Чебышов, **А.В. Журавлев**, П.И. Солодских

АО «СНИИП» – Москва, Россия

В докладе рассматриваются вопросы практической метрологии ионизирующего излучения, связанные с обеспечением эталонными физическими стендами, установками и приборами.

## Problematic Issues of Ionizing Radiation Metrology

Dr. S.B. Chebyshov, **A.V. Zhuravlev**, P.I. Solodskikh

JSC "SNIIP" – Moscow, Russia

The report discusses the issues of practical metrology of ionizing radiation, related to the provision of standards, metrological installations and reference measurement devices.

### Введение

Одной из наиболее важных задач в метрологии ионизирующих излучений, которая в настоящее время приобрела значительную актуальность, является обеспеченность выполняемых в отрасли измерений в области ионизирующих излучений эталонной базой, которая включает в себя эталонные установки, физические стенды и приборы.

АО «СНИИП» является одним из ведущих предприятий-изготовителей оборудования радиационного контроля для объектов использования атомной энергии как гражданского, так и специального назначения. Номенклатура блоков и устройств детектирования, производимых в АО «СНИИП», достаточно обширна и охватывает практически все виды радиационных измерений, осуществляемые автоматизированными системами радиационного контроля (АСРК):

- измерения доз и мощностей доз бета-и гамма-излучений;
- измерения потока и плотности потока быстрых, тепловых и промежуточных нейтронов;
- измерения объемной активности жидких сред;
- измерения объемной активностей газо-воздушных сред и р/а аэрозолей.

Основным условием поставки систем АСРК является их соответствие заявленным требованиям (включая метрологические требования). Выпускаемые блоки и устройства детектирования должны проходить испытания в целях утверждения типа (для вновь разрабатываемых блоков и устройств) и поверку.

Анализ состояния экспериментальной базы в РФ выявил наиболее проблемные области в части обеспеченности отрасли рабочими эталонами, которые представлены в табл. 1.

Остановимся несколько подробнее на этих проблемах.

### Дозиметрия гамма-излучения: дозиметрия высоких мощностей доз

Одной из основных функций современных АСРК является обеспечение дозиметрических измерений в условиях проектных и запроектных аварий. Обязательным метрологическим требованием к аварийным дозиметрам является возможность измерений мощностей доз в диапазоне, как минимум, до 100 Гр/ч. Однако лабораторные возможности метрологических институ-



тов не позволяют обеспечить такие значения мощностей доз. Имеющаяся установка в ГНМЦ МО РФ не сможет обеспечить потребности атомной отрасли в испытаниях в целях утверждения типа и поверке аварийных дозиметров.

На текущий момент АО «СНИИП» прорабатывает вопрос о создании на своей базе дозиметрической установки, которая сможет воспроизводить мощность кермы в диапазоне до 100 Гр/ч.

Таблица 1

Основные проблемные направления и способы их реализации

Направление	Текущее состояние дел
Низкофоновая дозиметрия гамма-излучения	В РФ отсутствуют эталоны в диапазоне ниже 0,1 мкГр/ч
Дозиметрия высокоинтенсивного гамма-излучения	Возможности существующих эталонов ограничены на уровне 20–30 Гр/ч при потребностях в 100 Гр/ч
Дозиметрия «жесткого» (от 3 до 10 МэВ) гамма-излучения	На текущий момент в РФ отсутствуют дозиметрические эталоны в диапазонах энергий от 3 до 10 МэВ
Измерения плотности потока промежуточных нейтронов	На текущий момент в РФ отсутствуют эталоны плотности потока промежуточных нейтронов. Существующие метрологические установки аттестованы как источники тепловых нейтронов
Измерения плотности потока нейтронов в диапазоне от $1 \cdot 10^5$ до $1 \cdot 10^7$ с <sup>-1</sup> ·см <sup>2</sup> и более	Существующие в РФ эталоны плотности потока тепловых нейтронов (с нуклидами Pu+Be, Am+Be) не позволяют обеспечить требуемый диапазон измерений
Измерения объемной активности жидких сред	Существующие эталоны не в полной мере обеспечивают метрологию радиометрических и спектрометрических измерений ОА жидких сред как по диапазону измерений ( $10^3$ – $10^9$ Бк/м <sup>3</sup> ), так и по требуемой номенклатуре радионуклидов

### Дозиметрия гамма-излучения: высокие энергии от 3 до 10 МэВ

Еще одним важным направлением в дозиметрии гамма-излучения является измерения мощностей доз в полях гамма-излучения с энергиями от 3 до 10 МэВ. На данный момент в РФ отсутствуют эталоны с энергией выше 1,25 МэВ (энергия радионуклида Co-60).

Для решения данной проблемы в 2020 году при содействии АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» и ГП «Грин Стар» специалистам АО «СНИИП» удалось провести испытания 4-х типов выпускаемых блоков детектирования на энергетическую зависимость в диапазоне энергий фотонного излучения от 3 до 7 МэВ. Испытания проводились в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» на ускорителе Тандем-3М. Испытания проводились на энергии гамма-квантов 4,44 МэВ, полученной реакцией  $^{12}\text{C}(p,p'\gamma)^{12}\text{C}$ , и на энергии 6,5 МэВ, полученной реакцией  $^{19}\text{F}(p,\alpha\gamma)^{16}\text{O}$ . Результаты данных испытаний были доложены на конференции «Ядерное приборостроение» в г. Сочи в 2021 году [1].

На текущий момент в АО «ГНЦ РФ-ФЭИ» совместно со АО «СНИИП» прорабатывается вопрос о метрологической аттестации создаваемых полей с энергиями 4,44 и 6,5 МэВ на базе ускорителя.



### **Измерения плотности потока нейтронов в диапазоне от $1 \cdot 10^5$ до $1 \cdot 10^7$ $\text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ и более**

Еще одной важной задачей являются нейтронные измерения. АО «СНИИП» является поставщиком большой номенклатуры блоков и устройств детектирования нейтронного излучения. Текущие требования к диапазонам измерений плотностей потоков нейтронов не в полной мере обеспечиваются отечественными метрологическими лабораториями.

Для обеспечения метрологии нейтронных блоков и устройств детекторов полями с плотностями потока более  $1 \cdot 10^7$   $\text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$  необходимо применение критических ядерных стенов, как наиболее приемлемых с экономической точки зрения. На текущий момент АО «СНИИП» совместно с НИЦ «Курчатовский институт» прорабатывают вопрос об использовании критического стенов «Квант» в качестве рабочего эталона.

Возможности стенов «Квант» позволят обеспечить выпускаемые блоки детектирования нейтронного излучения значениями плотности потока нейтронов до  $1 \cdot 10^9$   $\text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ .

### **Выводы**

В статье приведены проблемные вопросы, связанные с метрологическим обеспечением выпускаемой продукции для атомной отрасли. Для наиболее востребованных направлений предложены пути и способы решения, которые позволят полностью или частично обеспечить отрасль необходимыми диапазонами измерений.

Авторы статьи хотят обратить внимание на то, что реализация потребностей атомной отрасли невозможна без сотрудничества между ведущими предприятиями отрасли, метрологическими институтами и НИЯУ МИФИ.

### **Список литературы**

1. П.И. Солодских, С.Б. Чебышов, А.В. Журавлев и др. / Испытания на энергетическую зависимость блоков детектирования в диапазоне энергий фотонного излучения от 3 до 7 МэВ // Конф: Ядерное приборостроение. – Сочи, 2021.

## Характеристики спектрометра быстрых нейтронов на базе детектора с алмазным чувствительным элементом

**Р.Ф. Ибрагимов**<sup>1</sup>, к.ф.-м.н. В.В. Гаганов<sup>2</sup>, И.В. Урупа<sup>1</sup>, И.С. Вершинин<sup>2</sup>,  
к.ф.-м.н. Е.В. Рябева<sup>1</sup>, Я.А. Кокорев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ – Москва, Россия;

<sup>2</sup> ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» – Саров, Россия

В работе приводятся результаты экспериментальной оценки характеристик спектрометра быстрых нейтронов на базе детектора с алмазным чувствительным элементом. Представлены такие характеристики, как диапазон энергий регистрируемых нейтронов, энергетическое разрешение, влияние на результаты измерений сопутствующих излучений (гамма-квантов и рассеянных нейтронов), диапазон измеряемых плотностей потока нейтронов. Рассмотрен ряд эффектов, свойственных детекторам на базе алмаза, например, влияние эффекта поляризации на результаты измерений. Показана возможность спектрометрии нейтронов с энергией в области 14 МэВ с разрешением менее 1%, а также отсутствие влияния эффекта поляризации на работу детектора при измерениях в точках с плотностью потока быстрых нейтронов до  $10^7 \text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ .

## Characteristics of the Fast Neutron Spectrometer Based on Detector with Diamond Sensitive Element

**R.F. Ibragimov**<sup>1</sup>, PhD V.V. Gaganov<sup>2</sup>, I.V. Urupa<sup>1</sup>, I.S. Vershinin<sup>2</sup>, PhD E.V. Ryabeva<sup>1</sup>, Y.A. Kokorev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute) – Moscow, Russia;

<sup>2</sup> FSUE Russian Federal Nuclear Center – Russian Research Institute of Experimental Physics – Sarov, Russia

The paper presents the results of an experimental evaluation of the characteristics of a fast neutron spectrometer based on a detector with a diamond sensitive element. Consideration is given to such characteristics as the detected neutrons energy range, the energy resolution, the effect on the measurement results of associated radiation (gamma quanta and scattered neutrons), the range of measured neutron flux, as well as a number of effects inherent in diamond-based detectors, for example, the influence of the polarization effect. The possibility of 14 MeV neutrons spectrometry with a resolution of less than 1% is shown, as well as the absence of the polarization effect influence on the detector operation when measuring at points with a fast neutron flux value up to  $10^7 \text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Чувствительный элемент алмазного детектора представляет собой широкозонный полупроводник. При попадании в подобный детектор заряженной частицы с коротким пробегом и большой энергией амплитуда сигнала на выходе с детектора прямо пропорциональна выделившейся в нём энергии.

Принцип регистрации нейтронов алмазным детектором основан на сборе заряда, возникающего при торможении в веществе детектора заряженных частиц, возникающих при взаимодействии нейтрона с ядрами углерода. Перечень основных каналов взаимодействия быстрых нейтронов с ядрами углерода [1, 3, 4] приведен ниже (табл. 1). В последнем столбце

указана оценка энергии от продуктов реакции в алмазе при регистрации нейтронов с энергией 13,988 МэВ.

Помимо измерения энергии нейтронов, детектор на базе алмаза может успешно применяться и для радиометрических измерений плотности потока быстрых нейтронов. Применение такого детектора для задачи мониторинга потока нейтронов в генераторах позволяет получать более точную и оперативную информацию за счет низкой чувствительности детектора к гамма-излучению и малых размеров чувствительной части. Сигнал от гамма-квантов любой энергии в энергетическом эквиваленте от данного детектора не превышает уровень порядка 500 кэВ (при условии отсутствия наложения импульсов при высоких нагрузках детектора).

Малый размер чувствительной части детектора позволяет достичь максимального отношения между количеством первичных и рассеянных нейтронов, попадающих в него, при максимально близком размещении детектора к источнику первичных частиц. При этом детекторы на базе алмаза имеют хорошие показатели радиационной стойкости: флюенс нейтронов до  $10^{14}$  нейтрон/см<sup>2</sup>, и доза по гамма-излучению до 3 МГр [5].

Таблица 1

Основные каналы взаимодействия быстрых нейтронов с ядрами углерода

Ядерная реакция	Энергия реакции, МэВ	Энерговыведение от продуктов реакции, МэВ
$^{12}\text{C}(n,\alpha)^9\text{Be}$	-5,701	8,287 (пик)
$^{12}\text{C}(n,n')^3\alpha$	-7,367	6,621 (правая граница)
$^{12}\text{C}(n,n')^{12}\text{C}$	0	4,023 (правая граница)
$^{12}\text{C}(n,n')^{12}\text{C}^*$	-4,439	3,293 (правая граница)

Экспериментальная оценка спектрометрических свойств детектора на базе алмаза осуществлялась для детектора ДБ-10 с алмазным чувствительным элементом («УралАлмазИнвест», Россия). Технические характеристики детектора представлены в табл. 2. Для регистрации сигналов с детектора использовалась плата амплитудного анализатора SBS-77 («ГринСтар», Россия). Сигналы с детектора подавались на вход SBS-77 после предварительного усиления в зарядочувствительном усилителе ПУГ-37 («ГринСтар»). Источником напряжения, подаваемого на обкладку детектора, выступала непосредственно плата амплитудного анализатора SBS-77. Данная плата также являлась и источником низкого напряжения ( $\pm 12$  В) для питания зарядочувствительного усилителя.

Таблица 2

Характеристики детектора ДБ-10

Параметр	Значение
Наименование	ДБ-10
Тип алмаза	Искусственный, CVD
Размер чувствительной области	2×2×0,3 мм
Рабочее напряжение детектора	110 В
Тип регистрируемого излучения	$\alpha$ , $\beta$ , n

В качестве источников нейтронов в данной работе применялись электрофизические генераторы, работающие на базе реакции DT (генераторы ИНГ-07Т и НГ-150М), а также радиоизотопный капсульный источник на базе реакции  $\alpha$ -n (источник PuBe). Эксперименты с генератором ИНГ-07Т проводились с целью оценки влияния сопутствующего гамма-излучения, а также фона рассеянных нейтронов на результаты измерения выхода нейтронов из мишени генератора. С генератором НГ-150М проводилось исследование спектрометрических свойств регистрирующей системы по отношению к нейтронам с энергией в области 14 МэВ. Радиоизотопный источник использовался для оценки возможности применения детектора на базе алмаза для спектрометрии нейтронов со сложным энергетическим спектром, в состав которого входят нейтроны с энергией в диапазоне от 1 до 10 МэВ.

Из аппаратурных откликов, полученных в эксперименте с ИНГ-07Т, извлекалась информация о количестве нейтронов, вылетевших из мишени данного генератора. Для этого применялась следующая формула:

$$N_{ист} = \frac{N_{ник}}{G \cdot \left(1 - e^{-\frac{\sigma \rho N_a \cdot d}{M}}\right)}, \quad (1)$$

где  $N_{ист}$  – число нейтронов, вылетающих в единицу времени из источника,  $N_{ник}$  – скорость счета в области спектра, которая соответствует реакции  $^{12}\text{C}(n,\alpha)^9\text{Be}$  (импульс/с),  $\sigma$  – микроскопическое сечение реакции  $^{12}\text{C}(n,\alpha)^9\text{Be}$  для нейтронов с энергией 14,5 МэВ (68,55 мб),  $\rho$  – плотность вещества чувствительного элемента детектора (3,51 г/см<sup>3</sup>),  $N_a$  – постоянная Авогадро (моль<sup>-1</sup>),  $M$  – молярная масса вещества детектора (г/моль),  $d$  – толщина чувствительного элемента детектора (0,03 см),  $G$  – геометрический фактор, учитывающий ослабление потока излучения от источника на пути к детектору за счет геометрии и материалов конструктивных элементов, рассеивающих и поглощающих часть нейтронов.

В данной работе рассмотрен вариант его расчета с использованием инструментов моделирования Geant4. На рис. 1 показаны результаты проведенных экспериментов с генераторов ИНГ-07Т.

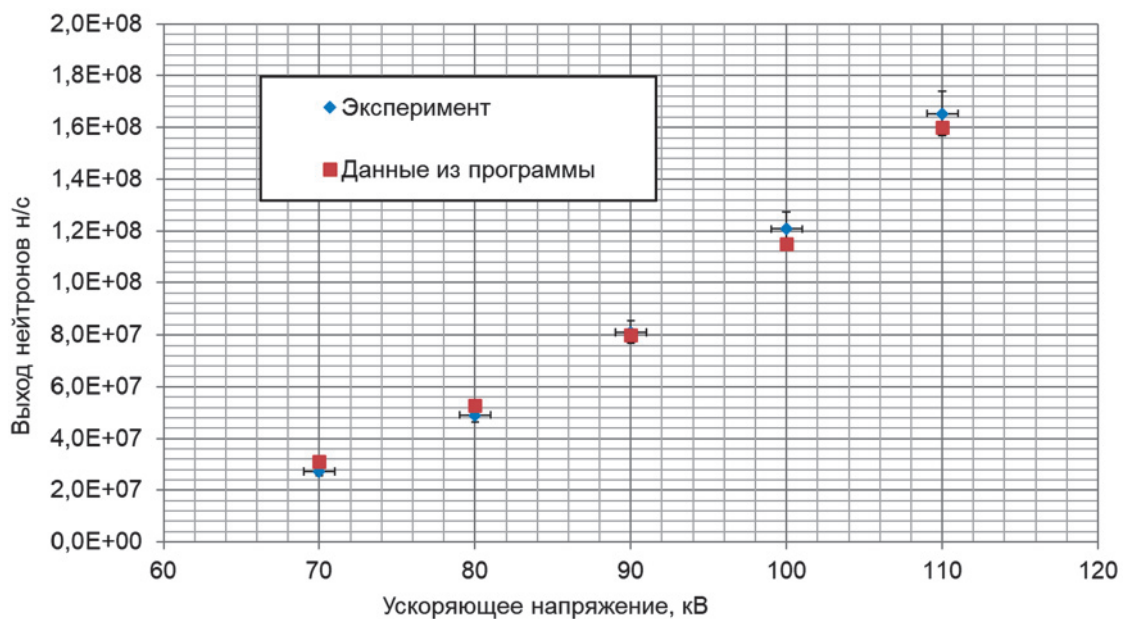


Рис. 1. Сравнение результатов оценки значения потока нейтронов из мишени нейтронного генератора по программе от производителя и с помощью детектора на базе алмаза в зависимости от ускоряющего напряжения

Область пика реакции  $^{12}\text{C}(n,\alpha)^9\text{Be}$  в экспериментальных откликах на излучение генератора НГ-150М сравнивалась с результатами расчёта по программе SRIANG [6, 2] (рис. 2).

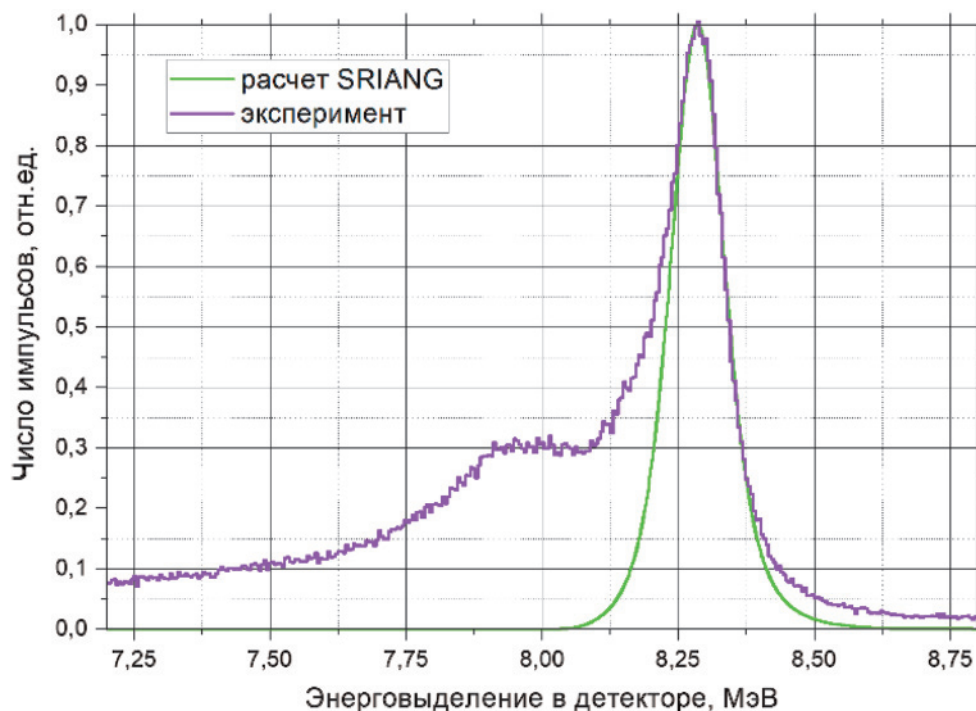


Рис. 2. Результат совмещения экспериментального и расчётного спектров отклика на поток DT-нейтронов

Условия расчёта с использованием данной программы: энергия дейтронов 0,130 МэВ (фактическое значение), угол размещения детектора  $97^\circ$ , отношение радиуса детектора к расстоянию до источника  $r/L=0,01$ . Энергетическое разрешение детектора моделировалось свёрткой результата расчёта по программе SRIANG с Гауссианом. Были подобраны масштабы амплитуд спектрометра и величина параметра Гауссиана, обеспечивающие оптимальное совмещение экспериментального и расчётного спектров отклика. Форма пика от реакции  $^{12}\text{C}(n,\alpha)^9\text{Be}$  описывается расчётом достаточно хорошо, за исключением «сателлитного пика» со стороны низких энергий (амплитуд). Совмещение было достигнуто при величине параметра Гауссиана  $\sigma=0,035$  МэВ (ширина на полувысоте  $fwhm=0,082$  МэВ). Данные характеристики соответствуют значению разрешения спектрометра 1% для поглощенной энергии 8,3 МэВ (что соответствует разрешению 0,6% для нейтронов с энергией 14 МэВ).

Для решения задачи восстановления спектров получена полностью расчетная матрица откликов для детектора на базе алмаза. Расчеты осуществлялись с использованием Geant4. Восстановление всех экспериментальных откликов осуществлялось с использованием итерационного алгоритма GRAVEL [7].

Анализ полученных результатов позволяет привести следующие оценки характеристик спектрометра нейтронов с детектором на базе алмаза: диапазон энергий регистрируемых нейтронов: от 0,1 до 15 МэВ; энергетическое разрешение 0,1 МэВ для нейтронов с энергией 14 МэВ; сопутствующее гамма-излучение дает вклад в отклик в области до 500 кэВ; рассеянные нейтроны источника (генератора) дают вклад в отклик в области до 5 МэВ; собственная эффективность регистрации порядка 1% по всему спектру и порядка 0,01% по пику реакции  $^{12}\text{C}(n,\alpha)^9\text{Be}$ ; влияние поляризации [8] на работу детектора не выявлено при работе в точке с плотностью потока  $10^7 \text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$  при времени измерений до 2000 секунд.



### Список литературы

1. S.V. Gvozdev, V.V. Frunze, V.N. Amosov. Numerical simulation of the energy spectrum of recoil nuclei and alpha particles from interactions of fast neutrons with diamond. – *Instruments and Experimental Techniques*, 2009, Vol. 52, No. 5, p. 637–645.
2. Gaganov V.V. Calculation of neutron spectra produced in neutron generator target: Code testing. – *Applied Radiation and Isotopes*, 2018, vol.133, p. 85–87.
3. M. Hodgson, A. Lohstroh, P. Sellin, D. Thomas Neutron detection performance of silicon carbide and diamond detectors with incomplete charge collection properties. – *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2017, vol.A847, p. 1–9.
4. F. Ruddy et al. The fast neutron response of 4H silicon carbide semiconductor radiation detectors. – *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2006, vol. 53, No. 3, p. 1666–1670.
5. F. Pompili et al. Radiation and thermal stress test on diamond detectors for the Radial Neutron Camera of ITER. – *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* Volume 936, 21, p. 62–64, 2019.
6. V.V. Gaganov, P.L. Usenko, M.A. Kryzhanovskaja Feasibility of the precise energy calibration for fast neutron spectrometers. – *Physics of Atomic Nuclei*, 2017, Vol. 80, No. 11, pp. 1651–1655.
7. Chen YongHao et al. Unfolding the fast neutron spectra of a BC501A liquid scintillation detector using GRAVEL method. – *Physics, Mechanics & Astronomy* 2014 Vol. 57 No. 10.
8. Р.Ф. Ибрагимов, В.В. Кадилин, Е.М. Тюрин, В.А. Колюбин Исследование явления поляризации в алмазных детекторах ионизирующего излучения / *Вестник Национального Исследовательского Ядерного Университета МИФИ* – 2014. – Т. 3 – С. 416–422.

## **Реализация программно-аппаратного обеспечения непрерывного радиационного контроля газоаerosольных сред**

**В.А. Кишев**, А.А. Иванов, Е.М. Ветошкин, д.т.н. С.Б. Чебышов

АО «СНИИП» – Москва, Россия

В докладе представлены результаты модернизации программно-технических средств измерения объемных активностей аэрозолей, йодов и инертных радиоактивных газов в системах вентиляции, выбросных коммуникациях и рабочих помещениях объектов использования атомной энергии (ОИАЭ).

## **Implementation of Software and Hardware for Continuous Radiation Monitoring of Gas-aerosol Media**

**V.A. Kishev**, A.A. Ivanov, E.M. Vetoshkin, Dr. S.B. Chebyshev

JSC "SNIIP" – Moscow, Russia

The Report present the results of the modernization of software and hardware tools for measuring the volumetric activities of aerosols, iodine and noble radioactive gases contained in air drawn from stacks, ventilation ducts and working areas of nuclear facilities.

### **Введение**

Газоаerosольный выброс АЭС является важнейшим критерием при оценке влияния на окружающую среду. Помимо прочего, результаты контроля выбросов могут быть надежным источником диагностической информации о текущем состоянии технологического процесса и герметичности оборудования.

Основными компонентами газоаerosольного выброса являются:

- инертные (благородные) радиоактивные газы (далее – ИРГ);
- радиоактивные аэрозоли;
- радиоактивный йод.

Контроль газоаerosольных сред на атомных станциях осуществляется как лабораторными методами, посредством периодического отбора проб с их последующим измерением, так и в непрерывном режиме штатными каналами автоматизированных систем радиационного контроля (далее – АСРК).

Проведя анализ требований к АСРК проектируемых ОИАЭ, в целях повышения конкурентоспособности выпускаемого оборудования в АО «СНИИП» была начата работа по совершенствованию технических средств радиационного контроля. Результаты модернизации представлены в докладе.

### **Непрерывный контроль инертных радиоактивных газов**

Газообразные выбросы на атомных электростанциях (далее – АЭС) являются результатом работы систем спецвентиляции и технологических сдувок. Для АЭС парциальный нуклидный состав газового выброса зависит не только от типа реакторной установки. Радионуклидный состав ИРГ работающего и остановленного энергоблока может значительно различаться. Вследствие чего задача непрерывного контроля объемной активности (далее – ОА) ИРГ сводится к регистрации суммарной  $\beta$ -активности предварительно очищенного воздуха.

Большинство существующего оборудования, предназначенного для измерения ОА ИРГ, основано на прокачке исследуемой пробы через измерительную камеру блока детектирования. В качестве детекторов излучения используются как кремниевые детекторы, так и органические сцинтилляторы [1].

Самым референтным блоком для измерения ОА ИРГ в АСРК АО «СНИИП» стал блок детектирования БДГБ-40Р. В качестве детектора была использована сцинтиллирующая пленка, изготовленная методом экструзии, обладающая низкой чувствительностью к сопутствующему гамма-излучению и обеспечивающая измерения на уровне фоновых значений за счет развитой поверхности детектора с большой площадью.

Результатом модернизации стало устройство детектирования УДГБ-47Р (рис. 1), выполненное из ряда законченных унифицированных технических средств. Для защиты от внешнего гамма-излучения и улучшения массогабаритных характеристик была применена вольфрамовая защита. Устройство оснащено блоком управления для накопления и обработки измерительной информации. В качестве детектора в устройстве применен пластиковый сцинтиллятор.

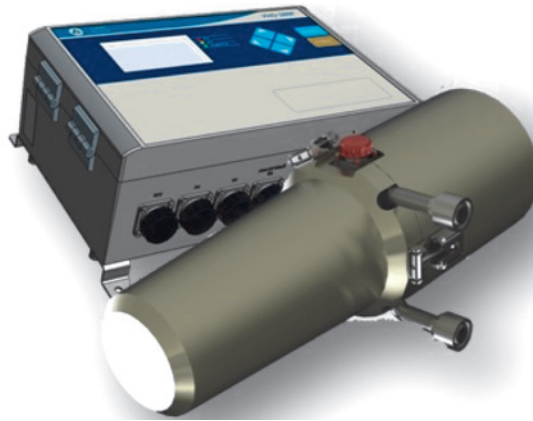


Рис. 1. Устройство детектирования УДГБ-47Р

Сравнительные технические характеристики приведены в табл. 1. Указанные характеристики приведены с учетом предварительных испытаний опытного образца с использованием вторичного эталона радиоактивных газов.

Таблица 1

Сравнительные характеристики БДГБ-40П и УДГБ-47Р

Наименование	БДГБ-40Р	УДГБ-47Р
Диапазон измерений, Бк/м <sup>3</sup>	от 1,0·10 <sup>3</sup> до 3,7·10 <sup>8</sup>	от 1,0·10 <sup>3</sup> до 3,7·10 <sup>12</sup>
Относительная основная погрешность при измерении ОА ИРГ, %	20	20
Масса, не более, кг	400	100
Назначенный срок службы, лет	10	15
Выход	Счетный выход	RS-485, USB

Указанные характеристики приведены с учетом предварительных испытаний опытного образца с использованием вторичного эталона радиоактивных газов.

### Непрерывный контроль радиоактивного йода

Все известные радионуклиды йода имеют техногенное происхождение. При выбросах в атмосферу радионуклиды йода становятся критическим компонентом загрязнения внешней среды ввиду их высокой биологической активности и радиотоксикологического действия [2]. Самым опасным изотопом признан йод-131 ввиду большого периода полураспада (8 суток) и высокого кумулятивного выхода.

По принципу действия оборудование непрерывного контроля йода основано на осаждении йодной составляющей путем сорбции на фильтрующие материалы и угольные картриджи с

последующим измерением. Для обеспечения измерения йодной компоненты газоаэрозольного выброса АО «СНИИП» поставляет на АЭС блоки детектирования БДАГ-05Р1, выполненные в виде ряда законченных технических решений.

Результатом модернизации стал УДАГ-09Р (рис. 2). Для повышения эффективности улавливания радиойода был разработан и запатентован сорбционный картридж в форме сосуда Маринелли. Узел детектора также подвергся модернизации и получил два исполнения на основе кристаллов  $\text{NaI(Tl)}$  и  $\text{LaBr}_3$ . Сравнительные технические характеристики приведены в табл. 2.



Рис. 2. Устройство детектирования УДАГ-09Р

Для подтверждения метрологических характеристик проведены натурные испытания с осаждением радиойода на применяемые сорбционные картриджи. Опытный образец устройств передан для проведения приемочных испытаний и подтверждения метрологических характеристик.

Таблица 2

Сравнительные характеристики БДАГ-05Р1 и УДАГ-09Р

Наименование	БДАГ-05Р1	УДАГ-09Р
Диапазон измерений, Бк/м <sup>3</sup>	от $3,7 \cdot 10^{-2}$ до $3,7 \cdot 10^6$	от $3,7 \cdot 10^{-2}$ до $3,7 \cdot 10^8$
Относительная основная погрешность при измерении ОА ИРГ, %	50	30
Масса, не более, кг	410	60
Назначенный срок службы, лет		
Выход	RS-485, RS-232	RS-485, USB

### Непрерывный контроль радиоактивных аэрозолей

Говоря о измерении объемной активности радиоактивных аэрозолей, подразумевают измерение аэрозолей техногенного происхождения, характерных технологическому процессу объекта использования атомной энергии [1]. По принципу работы оборудование непрерывного контроля ОА радиоактивных аэрозолей основано на аспирации контролируемой пробы на фильтрующих материалах с последующим измерением.

В настоящий момент самым распространенным блоком детектирования ОА аэрозолей является БДАС-04Р, который успешно эксплуатируется на Ростовской, Калининской станциях, а также ПАТЭС «Академик Ломоносов».

Эффективность улавливания аэрозольных частиц обеспечивается используемыми фильтрующими материалами [3]. В то время как представительность пробы непосредственно зависит от конструкции пробоотборного тракта.

В ходе работ по модернизации был смоделирован процесс осаждения пробы с помощью пакетов SolidWORKS FlowSimulation (рис. 3). При модернизации блока впервые были применены аддитивные технологии и усовершенствованы схмотехнические решения. Оптимизации были подвергнуты алгоритмы работы устройства, обеспечивающие полноценный спектрометрический метод компенсации радиоактивных аэрозолей естественного происхождения.

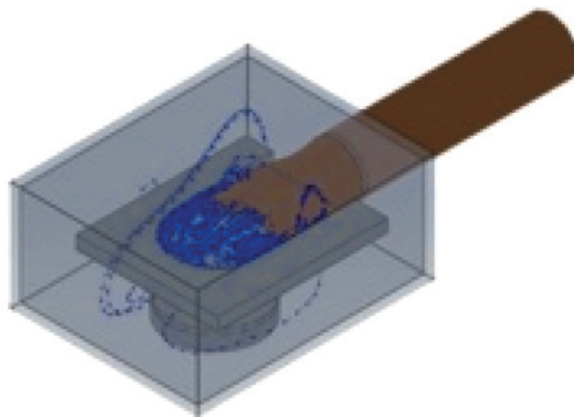


Рис. 3. Процесс моделирования осаждения пробы

Сравнительные технические характеристики блоков детектирования БДАС-04Р и БДАС-05Р приведены в табл. 3. Подтверждение указанных метрологических характеристик оборудования планируется с использованием вторичного эталона радиоактивных аэрозолей и специальных аэрозольных источников.

Таблица 3

Сравнительные характеристики БДАС-04Р и БДАС-05Р

Наименование	БДАС-04Р		БДАС-05Р	
	α-активные аэрозоли	β-активные аэрозоли	α-активные аэрозоли	β-активные аэрозоли
Диапазон измерений, Бк/м <sup>3</sup>	от 9·10 <sup>-3</sup> до 1·10 <sup>5</sup>	от 2·10 <sup>-2</sup> до 1·10 <sup>6</sup>	от 9·10 <sup>-3</sup> до 1·10 <sup>5</sup>	от 2·10 <sup>-2</sup> до 1·10 <sup>7</sup>
Основная погрешность при измерении ОА аэрозолей, %	50		20	
Назначенный срок службы, лет	10		15	
Масса, не более, кг	80		60	

### Заключение

Несмотря на «консервативность» аппаратуры радиационного контроля газоаэрозольных выбросов, АО «СНИИП» совершенствует свою продукцию, добиваясь высоких показателей эффективности, предупреждая и удовлетворяя требованиям проектируемых объектов использования атомной энергии.

Разработанные блоки и устройства обладают улучшенными показателями надежности, усовершенствованными метрологическими и сниженными массогабаритными характеристиками.

### Список литературы

1. Д.Е. Фертман, С.Б. Чебышов. Радиометрия сред. – М.: АО ФИД «Деловой экспресс», 2017. – 288 с.
2. Б.И. Стыро. Изотопы иода и радиационная безопасность. – СПб.: Гидрометеоздат, 1992. – 255 с.
3. А.К. Будыка, Н.Б. Борисов. Волокнистые фильтры для контроля загрязнения воздушной среды. – М.: ИздАт, 2008. – 360 с.



## **Возможность использования наведённой активности в конструкционных материалах стенда анализа горных пород для контроля за стабильностью процесса измерения**

к.ф.-м.н. **С.В. Колесников**, к.ф.-м.н. Е.В. Рябева, к.ф.-м.н. Н.В. Бойко,  
Е.Э. Лупарь, Р.Ф. Ибрагимов, С.Г. Рудаков, О.В. Чакилев

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ – Москва, Россия

Проведены исследования, показывающие возможность использования характерных линий вторичного гамма-излучения, возникающего в ходе активации конструкционных материалов стенда, в качестве реперных линий для осуществления контроля стабильности энергетической шкалы. Полученные результаты показали возможность применения данного метода для контроля стабильности измерительного тракта и позволили определить перечень химических элементов, по которым возможно осуществлять калибровку спектров образцов. К таким элементам относятся: железо, медь, алюминий, углерод, кислород.

## **The Using of Gamma Radiation of Induced Activity to Control the Stability of the Spectrometric Characteristics of the Equipment for the Analysis of the Elemental Composition of Rocks**

PhD **S.V. Kolesnikov**, PhD E.V. Ryabeva, PhD N.V. Boyko,  
E.E. Lupar, R.F. Ibragimov, S.G. Rudakov, O.V. Chakilev

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute) – Moscow, Russia

This work shows the possibility of using of characteristic lines of secondary gamma radiation, that occur during the activation of structural materials of the stand, as reference lines for monitoring the stability of the energy scale. The results showed the possibility of using this method to control the stability of the measuring path and allowed to determine the list of chemical elements, which can be used to calibrate the spectra of samples. These elements include: iron, copper, aluminum, carbon, oxygen.

Методика определения элементного состава горных пород основана на регистрации гамма-излучения образца, возникающего в реакциях неупругого рассеяния быстрых (ГИНР) и радиационного захвата термализованных (ГИРЗ) нейтронов. В качестве гамма-детектора в стенде используется сцинтилляционный детектор на основе монокристалла  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ , в качестве генератора нейтронов – ИНГ-07Т или ИНГ-07Д. Основа нейтронно-радиационного метода анализа вещества состоит в том, что энергия ГИНР и ГИРЗ характерна для каждого элемента, содержащегося в образце. Вместе с тем, количество гамма-квантов, зарегистрированных детектором в определенных энергетических областях, пропорционально концентрации элементов, испускающих данные гамма-кванты. Следовательно, измерение скоростей счета в различных, характерных для каждого элемента энергетических областях, даёт возможность определения относительного содержания элементов в горных породах. Диапазон измеряемой энергии гамма-излучения лежит в пределах от сотен кэВ до десятков МэВ.

В ходе проведения длительных спектрометрических измерений необходимо осуществлять контроль за ходом эксперимента и вносить корректировки в получаемые данные. При длитель-

ной работе стенда излучение, возникающее в результате активации конструкционных материалов, может быть использовано как реперный сигнал. Целью данной работы было измерение спектра вторичного гамма-излучения активированных узлов установки (генератора, детектора, деталей конструкции) и подтверждение возможности использования характерных линий в качестве реперных линий при обработке спектров. Для достижения упомянутой выше цели были поставлены следующие задачи:

1. Определить элементы, входящие в конструкцию стенда, характерные линии активационного гамма-излучения которых можно использовать как реперные сигналы;
2. Определить время активации, которое необходимо для появления устойчивого сигнала.

Мишень генератора нейтронов окружена различными конструкционными материалами. Конструктивные элементы генератора включают в себя ускорительные блоки, системы охлаждения и изоляторы. Они состоят из различных материалов, таких как изоляционное масло, нержавеющая сталь, керамика, стекло, полиамид, латунь и феррит. Преимущественно конструкция генератора состоит из таких элементов, как алюминий, железо, медь. Поэтому предполагается, что их вклад в наведенную активность генератора будет доминирующим. Вклад в наведенную активность установки от гамма-детектора  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  в первую очередь обусловлен веществами кристалла La, Br, Ce и их изотопами.

Собственный фон кристаллов бромида лантана в основном формируется за счет распада радиоизотопа  $\text{La}^{138}$ , который распадается путем электронного захвата (66,4%) в  $\text{Ba}^{138}$  и путем бета-распада (33,6%) в  $\text{Ce}^{138}$ . Электронный захват сопровождается испусканием  $\gamma$ -квантов с энергией 1436 кэВ и рентгеновского излучения,  $\beta$ -распад сопровождается гамма-излучением с энергией 789 кэВ. Пик с энергией  $\sim 1,45$  МэВ, помимо  $\gamma$ -квантов с энергией 1,436 МэВ, формируют  $\gamma$ -кванты внешнего фона с энергией 1,461 МэВ, возникающие при распаде радиоактивного изотопа  $\text{K}^{40}$ , который содержится во многих материалах, в частности, в стекле входного окна ФЭУ. Наличие пиков  $\text{Bi}^{214}$ ,  $\text{Pb}^{214}$ ,  $\text{Tl}^{208}$  обусловлено дочерними продуктами распада природного гамма-фона. Полученные экспериментальные данные (рис. 1) совпадают с ожидаемыми [1].

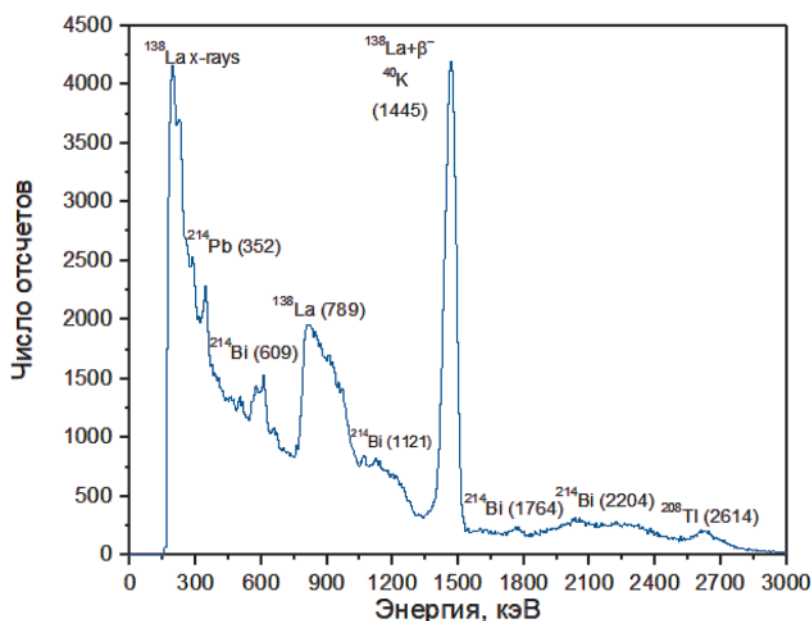


Рис. 1. Экспериментальный фоновый спектр  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$

Через некоторое время после начала облучения рост числа активных ядер прекращается. Это происходит тогда, когда в единицу времени будет образовываться столько же радиоактив-

ных ядер, сколько и распадаться. Величина, соответствующая данному равновесному состоянию, называется активацией насыщения. Кривая активации показана на рис. 2. Аппроксимация экспериментальных данных проводилась с помощью экспоненциальной функции. Исходя из данных аппроксимированной функции, следует, что  $\tau = 12,9 \pm 0,7$  мин,  $T_{1/2} = 8,9 \pm 0,5$  мин, а насыщение наступает через  $\approx 5 T_{1/2} = 45$  мин.

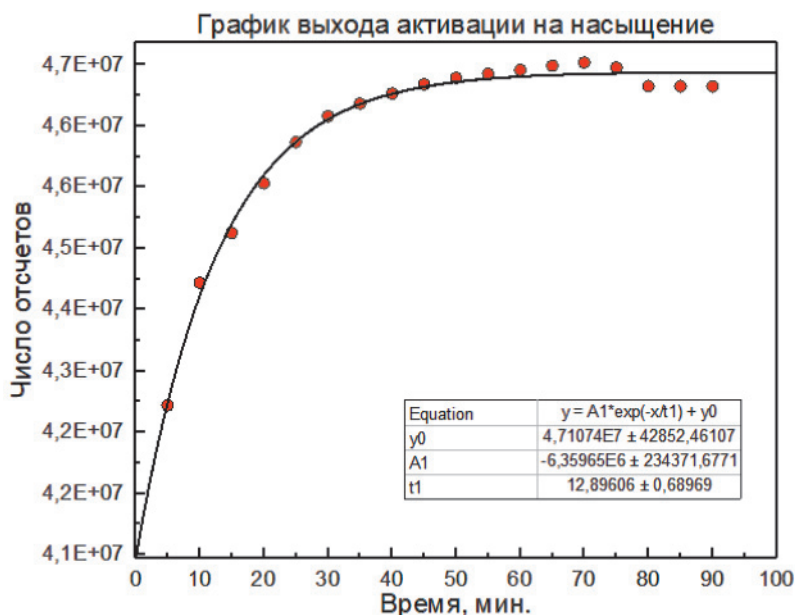


Рис. 2. График выхода активации на насыщение  
(расстояние между генератором и детектором 10 см, поток  $1 \cdot 10^5$  нейтрон/с)

На рис. 3 показан спектр вторичного гамма-излучения. Идентификация неизвестных линий излучения активированных материалов установки проводилась аппроксимацией неизвестного пика кривой Гаусса. Большая часть излучения возникает в результате реакций неупругого рассеяния быстрых нейтронов. Однако некоторые из  $\gamma$ -линий могут быть результатом захвата тепловых нейтронов на конструкционных материалах, а также наведенной активности установки.

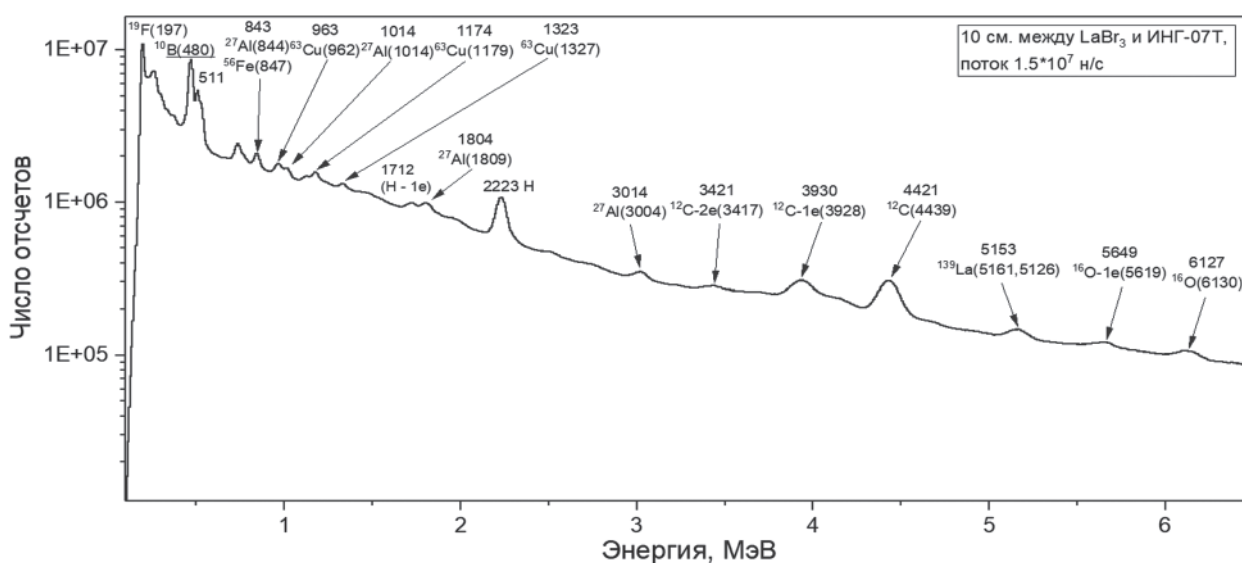


Рис. 3. Спектр вторичного гамма-излучения установки

Например, пик 2,2 МэВ, связан с захватом тепловых нейтронов водородом охлаждающей жидкости и изоляционного масла. Пик энергией 511 кэВ появляется в результате распада, поэтому становится постоянной величиной спустя время выхода активации на насыщение. Наличие пика 480 кэВ связано с биологической защитой из борированного полиэтилена толщиной 50 см. Большое количество пиков активности связано с реакциями неупругого рассеяния на конструкционных материалах генератора: медь (материал мишени), железо и алюминий (материал корпуса и составляющих элементов), фтор (материал фторпластовых изоляторов). Наличие углерода связано прежде всего с его большим содержанием в изоляционном масле. В табл. 1 приводятся характеристики основных линий вторичного гамма-излучения установки.

Таблица 1

Перечень изотопов вторичного гамма-излучения

Реакция	Сечение реакции $\sigma_{табл}$ , барн	$E_{экс}$ , кэВ	$E_{табл}$ , кэВ
$^{19}\text{F}(n,n')^{19}\text{F}$	0,146	198±9	197
$\text{B}(n,\alpha)$ *	750	467±10	478
$^{63}\text{Cu}(n,2n)^{62}\text{Cu}$	0,45	505±10	511
$^{65}\text{Cu}(n,2n)^{64}\text{Cu}$	0,97		
$^{27}\text{Al}(n,n')^{27}\text{Al}$	0,111	843±12	844
$^{56}\text{Fe}(n,n')^{56}\text{Fe}$	0,621		847
$^{63}\text{Cu}(n,n')^{63}\text{Cu}$	0,202	963±13	962
$^{27}\text{Al}(n,n')^{27}\text{Al}$	0,111	1014±13	1014
$^{63}\text{Cu}(n,n')^{63}\text{Cu}$	0,156	1174±14	1179
$^{63}\text{Cu}(n,n')^{63}\text{Cu}$	0,122	1323±15	1327
$^1\text{H} - e$	0,334	1720±15	1712
$^{27}\text{Al}(n,n')^{27}\text{Al}$	0,111	1804±18	1809
$^1\text{H}(n,\gamma)^2\text{D}$ *	0,334	2223±21	2223
$^{27}\text{Al}(n,n')^{27}\text{Al}$	0,111	3014±25	3004
$^{12}\text{C} - 2e$	0,187	3421±27	3417
$^{12}\text{C} - 1e$	0,187	3930±30	3928
$^{12}\text{C}(n,n')^{12}\text{C}$	0,187	4421±34	4439
$^{139}\text{La}(n,\gamma)^{139}\text{La}$ *	0,114	5153±39	5126
$^{139}\text{La}(n,\gamma)^{139}\text{La}$ *	0,089		5161
$^{16}\text{O} - 1e$	0,173	5649±43	5619
$^{16}\text{O}(n,n')^{16}\text{O}$	0,173	6127±48	6130

Реакции на тепловых нейтронах отмечены \*, табличные данные взяты из источника [2].

### Список литературы

1. Литвак М.Л., Митрофанов И.Г., Козырев А.С. [и др.] / Градуировка  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  детектора для исследований элементного состава поверхности планет методом гамма-спектрометрии / ИСМАРТ-2012: Институт космических исследований РАН, Москва: Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 2012. – 7 с.
2. Status of experimental and evaluated discrete  $\gamma$ -ray production at  $E_n=14.5$  MeV / S. P. Simakov, A. Pavlik, H. Vonach et al. / Final Report of Research Contract 7809/RB, performed under the CRP on Measurement, Calculation and Evaluation of Photon Production Data. – Institute of Physics and Power Engineering, Obninsk, Russia: Institut für Radiumforschung und Kernphysik, University of Vienna, Austria: Institute of Physics SAS, Bratislava, Slovakia, 1998.
3. Experimental and numerical investigations of radiation characteristics of Russian portable/compact pulsed neutron generators: ING-031, ING-07, ING-06 and ING-10-20-120 / Chernikova D., Romodanov V.L., Belevitin A.G. et al. / Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 746 (2014) 74–86.

## Чувствительные элементы для детектирования водорода на основе газохромных и газогирохромных материалов

**Д.П. Куликова**<sup>1,2</sup>, к.ф.-м.н. Е.М. Сгибнев<sup>1</sup>, к.ф.-м.н. Г.М. Янковский<sup>1</sup>,  
К.Н. Афанасьев<sup>1,3</sup>, И.В. Быков<sup>1,3</sup>, д.ф.-м.н. А.В. Барышев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова» – Москва, Россия;

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова – Москва, Россия;

<sup>3</sup> Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН (ИТПЭ РАН) – Москва, Россия

Исследовались особенности оптического отклика одномерных наноструктур (1D решеток) и многослойных структур на основе газохромного оксида  $WO_3$  и катализатора Pd при их взаимодействии с водородом. Исследованные образцы имели защитные слои из полимеров ПВХ и ПММА. Внимание уделено кинетикам отклика в процессе окислительно-восстановительных реакций и деградации чувствительных элементов. Обнаружено, что в случае окисленного пермаллоя существенно изменяется магнитооптический отклик в водородосодержащей газовой смеси. Демонстрируется возможность кратного увеличения угла фарадеевского вращения плоскости поляризации света, что подтверждает невзаимность наблюдаемого эффекта, то есть явление «газогирохромизма».

## Sensitive Elements Based on Gasochromic and Gasogyrochromic Materials for Hydrogen Detection

**D.P. Kulikova**<sup>1,2</sup>, PhD Y.M. Sgibnev<sup>1</sup>, PhD G.M. Yankosvkii<sup>1</sup>,  
K.N. Afanasyev<sup>1,3</sup>, I.V. Bykov<sup>1,3</sup>, Dr. A.V. Baryshev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> FSUE Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA) – Moscow, Russia;

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University – Moscow, Russia;

<sup>3</sup> Institute for Theoretical and Applied Electromagnetics, Russian Academy of Sciences – Moscow, Russia

The features of the optical response on hydrogen of 1D grating and planar multilayer structures based on gasochromic oxide  $WO_3$  and catalyst metal were investigated. Samples under study were covered with protective polymer layers PVC and PMMA. Great attention was paid to the kinetics of response in the course of redox reactions and degradation of sensitive elements. In case of oxidized permalloy films, it was found that they demonstrated magneto-optical response on hydrogen. The observed effect was proved to have the nonreciprocal nature, thus demonstrating “gasogyrochromism” of the magnetic oxides under study.

В связи с развитием водородной энергетики разработка быстрых и чувствительных газовых сенсоров является актуальной задачей. Оптические сенсоры на водород имеют ряд преимуществ перед другими типами датчиков: работа при комнатной температуре, отсутствие контакта проводника с газовой смесью, возможность реализации удалённого считывания показаний и пр. [1]. В таких сенсорах измеряемой величиной является относительное изменение амплитуды прошедшего или отражённого света, вызванное изменением диэлектрической проницаемости газочувствительного материала, а именно – диагональных элементов её матрицы. Часто чувствительным элементом в оптических датчиках является газохромный оксид ( $WO_3$ ,  $VO_2$ ,



MoO<sub>3</sub> и др.) с нанесённым на него катализатором Pd или Pt [2]. Наноструктурирование подобных систем приводит к повышению чувствительности разрабатываемого сенсора [3]. Важно отметить, что изменение оптических констант является обратимым до тех пор, пока не происходит деградация катализатора или контактного слоя между катализатором и газохромным оксидом.

Разработка магнитооптического сенсора водорода представляет большой интерес, так как, во-первых, присутствие газа приводит к изменению недиагональных элементов матрицы диэлектрической проницаемости чувствительного элемента, во-вторых, появляется возможность накапливать полезный сигнал в многопроходных оптических схемах благодаря свойству не взаимности.

В данной работе демонстрируются особенности оптического отклика одномерных наноструктур (1D решётка) и многослойных планарных структур на основе WO<sub>3</sub> и катализатора Pd и обсуждается влияние защитного полимерного покрытия на деградацию чувствительного элемента. Представлены экспериментальные результаты, подтверждающие возможность использования магнитного оксида – оксидированного пермаллоя – для магнитооптического детектирования водорода.

Образец наноструктуры представлял собой одномерную решётку из Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с периодом 480 нм, покрытой слоем WO<sub>3</sub> толщиной 110 нм и тонким слоем катализатора Pd толщиной 1 нм. Спектр пропускания структуры при ориентации поляризации падающего излучения параллельно полосам решётки представлен на рис. 1а. Планарная структура состояла из слоя WO<sub>3</sub> толщиной 155 нм с нанесённым на него слоем Pd толщиной 1 нм. Изменение пропускания исходного образца одномерной решётки в сухом воздухе (80% N<sub>2</sub> + 20 % O<sub>2</sub>) с содержанием 100 ppm и 1 000 ppm водорода составляло 1% и 4,5%, соответственно (рис. 1б). Отклик на водород планарной структуры измерялся в геометрии полного внутреннего отражения (рис. 2). В случае исходной наноструктуры и планарной плёнки характерное время отклика на 1 000 ppm H<sub>2</sub> в искусственном воздухе составляло порядка нескольких минут. В результате многократного воздействия водорода чувствительные элементы деградировали: время отклика обоих образцов увеличилось на порядок, а одномерная решётка утратила способность детектировать 100 ppm H<sub>2</sub>.

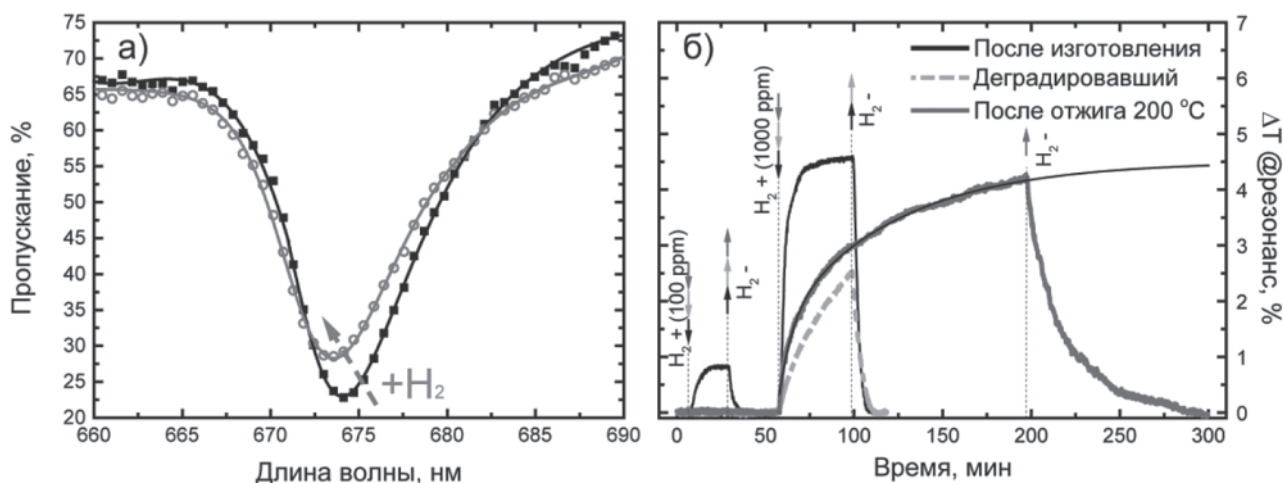


Рис. 1. а) Спектры пропускания одномерной решётки WO<sub>3</sub>/Pd в атмосфере сухого воздуха и в водородосодержащей атмосфере (вектор E волны параллелен полосам решётки); б) кинетики отклика образца одномерной решётки WO<sub>3</sub>/Pd

Покрытие исходного планарного образца слоями полимеров ПВХ и ПММА толщиной 50 нм не привело к существенным изменениям времени отклика чувствительного элемента (рис. 2а).

Однако наличие полимера предотвращает его деградацию: несмотря на уменьшение амплитуды отклика в результате многократного воздействия водорода, характерное время отклика также составляло несколько минут (рис. 2б).

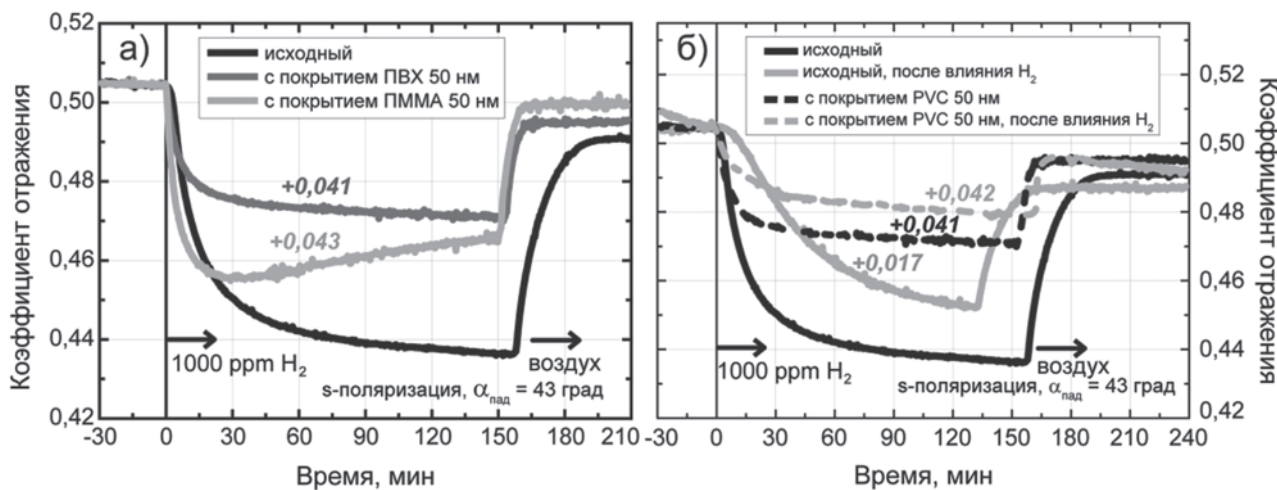


Рис. 2. Изменение коэффициента отражения планарной структуры WO<sub>3</sub>/Pd в процессе окислительно-восстановительных реакций (все зависимости приведены к общему начальному уровню – к величине коэффициента отражения исходного непокрытого образца)

Полученные результаты свидетельствуют в пользу того, что полимерные слои могут быть использованы как защитные покрытия газохромных чувствительных элементов с целью предотвращения их деградации, при этом сохраняется чувствительность на уровне единиц ppm.

Образцы плёнок пермаллоя толщиной 30–40 нм на стеклянных подложках были отожжены в воздухе в диапазоне температур 300–450 °С в течение часа. Было установлено, что значение угла фарадеевского вращения испытывает рост в ближней инфракрасной области спектра по мере увеличения температуры [4]. Отжиг при температурах выше 425 °С приводил к уменьшению угла фарадеевского вращения. Для экспериментов по магнитооптическому отклику на водород был выбран образец пермаллоя, окисленный при 425 °С (далее – NiFeO<sub>x</sub>), так как он обладал наибольшей величиной угла фарадеевского вращения. В качестве катализатора на отожжённую плёнку пермаллоя был нанесён тонкий слой платины толщиной 5 нм. Изготовленный образец помещался в немагнитную газовую ячейку с кварцевыми окнами, установленную между полюсами электромагнита.

На рис. 3а, 3б представлены изменения спектров пропускания ( $T$ ) и фарадеевского вращения ( $\theta_F, \theta$ ), вызванные нанесением слоя платины на NiFeO<sub>x</sub> ( $\Delta T, \theta_{Pt}(T, \theta_{NiFeO_x/Pt} - T, \theta_{NiFeO_x})$ , кривая 1) и откликом на 0,5 об.% водорода в атмосфере сухого азота ( $\Delta T, \theta_{H_2}(T, \theta_{NiFeO_x/Pt} \text{ после } H_2 - T, \theta_{NNiFeO_x/Pt} \text{ в воздухе})$ , кривая 2). Из анализа полученных зависимостей можно сделать вывод, что магнитооптический отклик на водород связан с изменением кислородного окружения атомов металлов в оксиде NiFeO<sub>x</sub>, а уменьшение коэффициента пропускания характерно для газохромных материалов при протекании реакции восстановления.

После взаимодействия с водородом оптические и магнитооптические свойства исследуемых плёнок NiFeO<sub>x</sub>/Pt не изменялись на протяжении нескольких месяцев. С целью возвращения образца в исходное состояние он был отожжён при 300 °С в течение получаса и вновь исследован. На рис. 3а, 3б кривые 3 соответствуют изменениям в пропускании и величине фарадеевского вращения, произошедшим в результате отжига структуры:  $\Delta T, \theta_{300^\circ C}(T, \theta_{NiFeO_x/Pt} \text{ после } 300^\circ C - T, \theta_{NNiFeO_x/Pt} \text{ в } H_2)$ . Видно, что термическое воздействие привело к дальнейшему уменьшению коэффициента пропускания и фарадеевского вращения.

Все полученные образцы были исследованы на предмет реакции на 0,5 об.% водорода. На рис. 3в представлены кинетики магнитооптического отклика: неотожжённая плёнка пермаллоя с нанесённым на него слоем катализатора и оксидированная плёнка пермаллоя  $\text{NiFeO}_x$  не обладают откликом на водород. С другой стороны, магнитооптическое вращение исходного и отожжённого образцов  $\text{NiFeO}_x/\text{Pt}$  меняется в присутствии водорода и приходит к равновесному состоянию на 20 минуте воздействия.

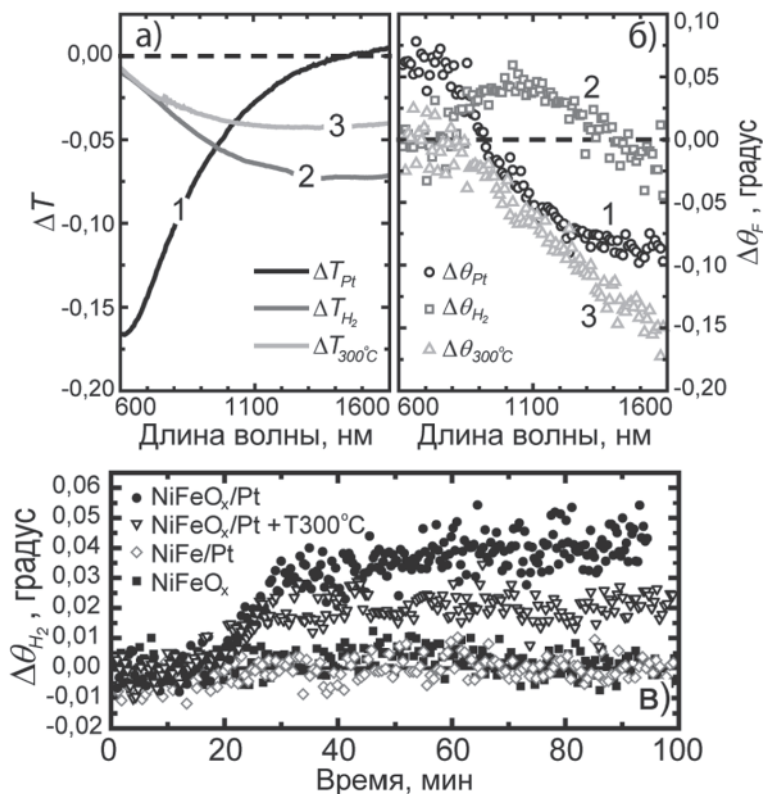


Рис. 3. а), б) Изменения спектров пропускания ( $\Delta T$ ) и фарадеевского вращения ( $\Delta\theta$ ,  $\Delta\theta_F$ ) образцов оксидированного пермаллоя, вызванные нанесением слоя катализатора Pt (кривая 1), дальнейшим воздействием 0,5 об.% водорода (кривая 2) и отжигом при 300 °С в течение получаса (кривая 3); в) кинетика отклика образцов исходного и оксидированного пермаллоя

Для доказательства невзаимной природы наблюдаемого эффекта исследуемый образец  $\text{NiFeO}_x/\text{Pt}$  был помещён между двумя зеркалами так, чтобы свет трёхкратно проходил через образец (рис. 4). Отношения величин фарадеевского вращения, измеренных в трёхпроходной схеме и при одном проходе, для исходного образца  $\text{NiFeO}_x/\text{Pt}$  и аналогичного образца после. Полученный результат свидетельствует о накоплении вращения плоскости поляризации при многократном прохождении света через образец, т.е. о невзаимной природе магнитооптического отклика. Воздействия водорода составляют  $(2,52 \pm 0,09)$  и  $(2,69 \pm 0,16)$ , соответственно. Следовательно, величина отклика на водород может быть увеличена как минимум кратно количеству проходов света через чувствительный элемент.

Таким образом, было установлено, что плёнка оксидированного пермаллоя, покрытая слоем катализатора Pt, обладает оптическим и магнитооптическим откликом на водород. После взаимодействия с водородом образец сохраняет свои свойства на протяжении нескольких месяцев. Доказано, что при многократном проходе света через магнитооптический чувствительный элемент происходит накопление вращения его плоскости поляризации, что говорит о «газогирохромизме» исследуемых плёнок.

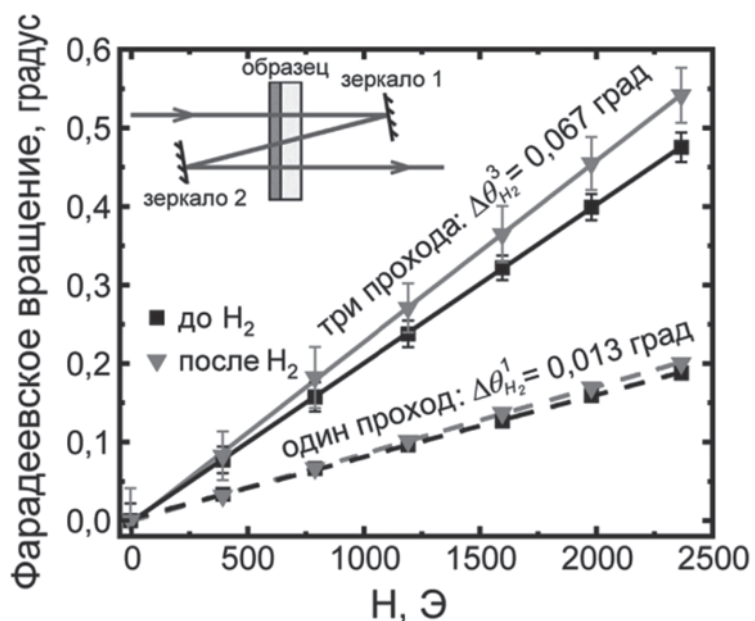


Рис. 4. Зависимость величины фарадеевского вращения от величины магнитного поля плёнки  $\text{NiFeO}_x/\text{Pt}$  до и после воздействия водорода при однократном и трёхкратном проходах света через образец

### Список литературы

1. A. Mirzaei, J.H. Kim, H.W. Kim, S.S. Kim. / Gasochromic  $\text{WO}_3$  Nanostructures for the Detection of Hydrogen Gas: An Overview // *Appl. Sci.* – 2019. – Т. 9. – С. 1775.
2. S. Okazaki and S. Johjima. / Temperature Dependence and Degradation of Gasochromic Response Behavior in Hydrogen Sensing with  $\text{Pt}/\text{WO}_3$  Thin Film // *Thin Solid Films.* – 2014. – Т. 558. – С. 411.
3. C. Wongchoosuk, A. Wisitsoraat, D. Phokharatkul, A. Tuantranont, T. Kerdechaoen. / Multi-Walled Carbon Nanotube-Doped Tungsten Oxide Thin Films for Hydrogen Gas Sensing // *Sensors.* – 2010. – Т. 10. – С. 7705–7715.
4. D.P. Kulikova, K.N. Afanasyev, I.V. Bykov, S.L. Efremova, A.R. Pomozov, E.E. Shalygina, A.V. Baryshev / Transformation of Magneto-Optical Figure of Merit for Permalloy Nanofilms upon Oxidation // *Opt. Mater.* – 2020. – Т. 107. – С. 110067.

## Вакуумно-технологический комплекс ЛОТОС 2I-VE для формирования перспективных покрытий и пленочных электродных систем

к.т.н. С.Г. Давыдов, д.ф.-м.н. А.Н. Долгов, **В.А. Максимов**, к.т.н. В.О. Ревазов, к.т.н. Р.Х. Якубов

ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова» – Москва, Россия

Представлены автоматизированный вакуумно-технологический комплекс ЛОТОС 2I-VE и текущее состояние в области создания пленочных электродных систем. Рассмотрены особенности имеющегося технологического оборудования для создания перспективных многофункциональных пленочных покрытий.

## Vacuum-technological Complex LOTOS 2I-VE for the Formation of Perspective Films and Electrode Systems

PhD S.G. Davydov, Dr. A.N. Dolgov, **V.A. Maksimov**, PhD V.O. Revazov, PhD R.Kh. Yakubov

FSUE Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA) – Moscow, Russia

The automated vacuum-technological complex is presented, the current state in the field of creation of film electrode systems. The present features of the changing equipment for the creation of promising multifunctional films.

### Введение

Пленочные покрытия нашли широкое применение в слаботочных устройствах, таких как микросхемы, и сильноточных устройств, работающих в условиях быстропротекающих процессов. К последним предъявляются требования высокой эрозионной стойкости.

При изготовлении перспективных пленочных покрытий во ФГУП «ВНИИА» используется автоматизированный вакуумно-технологический комплекс (ВТК) ЛОТОС 2I-VE, оснащенный устройствами физического и термического распыления, имеющий также набор инструментов для качественной подготовки поверхности подложки под нанесение покрытий.

### Вакуумно-технологический комплекс ЛОТОС 2I-VE

В состав ВТК ЛОТОС 2I-VE входят: вакуумная камера, установленная на металлическом каркасе, откачные средства и электротехнические шкафы, в которых размещены блоки управления и питания.

Имеющиеся средства вакуумной откачки позволяют получать безмасляный вакуум глубиной до  $5 \cdot 10^{-5}$  Па.

Общий вид ВТК ЛОТОС 2I-VE представлен на рис. 1.

Комплекс позволяет выполнять следующие операции за один технологический цикл откачки:

- формирование одно/многокомпонентных пленок различного функционального назначения методом магнетронного распыления на постоянном токе (МР),
- формирование субмикронных структур (диэлектрики, проводники, полупроводники) методом ионно-лучевого распыления (ИЛР),
- формирование пленок с повышенными требованиями к наличию различного рода примесей методом электронно-лучевого распыления (ЭЛР),
- термическая активация подложки и последующий вакуумный отжиг сформированных пленок с использованием резистивного нагревателя с температурой до 600 °С.



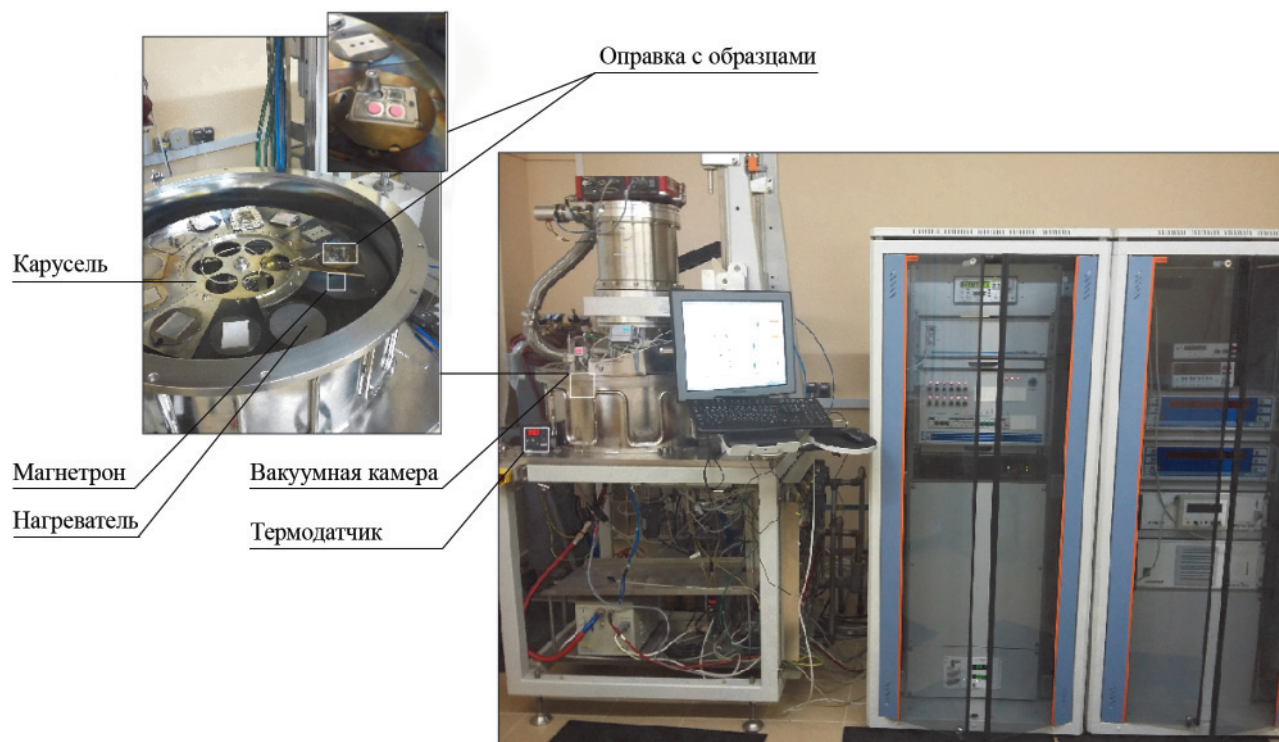


Рис. 1. Вакуумный технологический комплекс ЛОТОС 2I-VE

Вакуумный комплекс имеет хороший потенциал для модернизации, в частности, в настоящее время выполняется его дооснащение ВЧ-магнетроном, многоканальной системой газонапуска и генератором кислорода. В результате, становится возможным формирование широкой гаммы оксидсодержащих пленок, а наличие генератора кислорода позволяет получать пленки с минимальным количеством нежелательных примесей. Многоканальная система газонапуска расширяет возможности по формированию сложносоставных пленок переменного состава, а высокий уровень автоматизации комплекса обеспечивает высокую повторяемость формируемых пленочных структур.

Интегрированное программное обеспечение простой архитектуры, позволяющее выполнять технологические операции как в ручном, так и в автоматическом режиме, делает возможным более полное раскрытие исследовательских возможностей настоящего вакуумного комплекса.

### **Обзор результатов формирования покрытий и исследований**

ВТК «Лотос» активно применяется при изготовлении узлов экспериментальных макетов миниатюрных разрядников нового поколения для формирования пленочных покрытий в широком диапазоне толщин от 20 нм до 10 мкм. Для обеспечения оперативного контроля толщины и электрического сопротивления выполнена разработка и внедрение стенда по контролю сопротивления методом Кельвина с использованием четырехзондового измерительного устройства (рис. 2).

На ВТК «Лотос» успешно реализовано изготовление следующих пленочных систем:

- из сложносоставных мишеней магнетронным распылением на постоянном токе в среде аргона получены пленки состава SiC, TiC, Bi:YIG;
- магнетронным распылением на постоянном токе в реакционной среде: TiN, AlN, ZrN, Ti(O, N), Mg(O, N), Al(O, N), Zr(O, N) и др.;
- методами ИЛР, МР и ЭЛР выполнено осаждение пленок из мономишеней, такие как V, Nb, Ta, Ni, Ti и др.

Общий вид сформированных пленочных электродов представлен на рис. 3, 4.

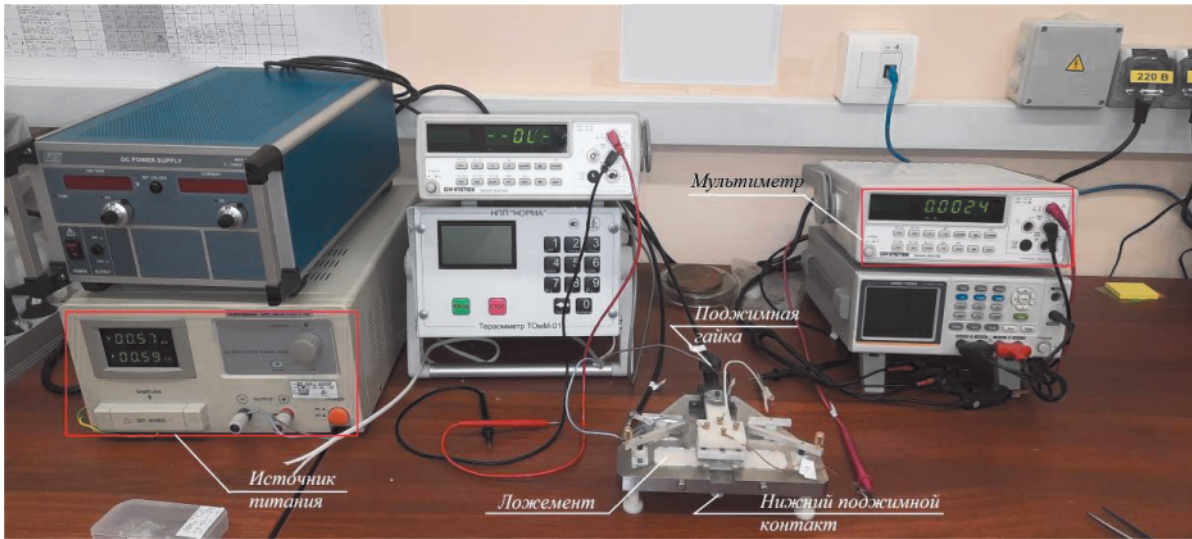


Рис. 2. Стенд по контролю сопротивления и толщины пленок

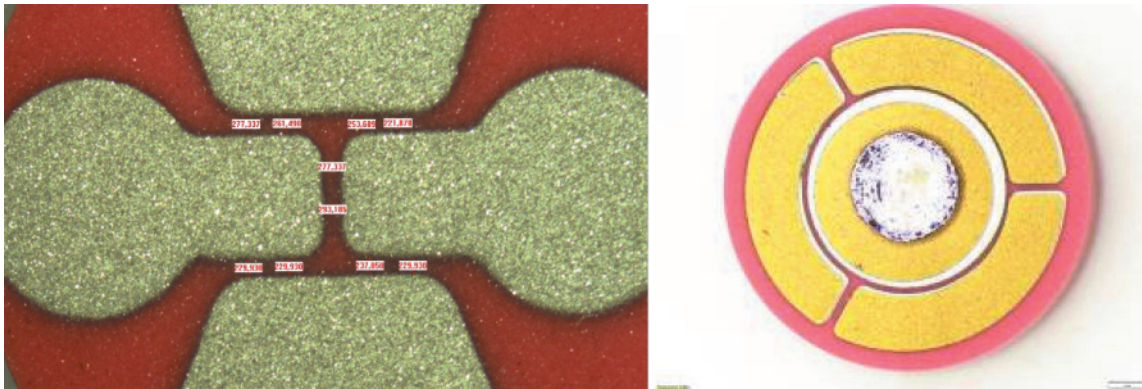


Рис. 3. Образцы пленочных электродных систем (слева – AMц, справа – TiN)

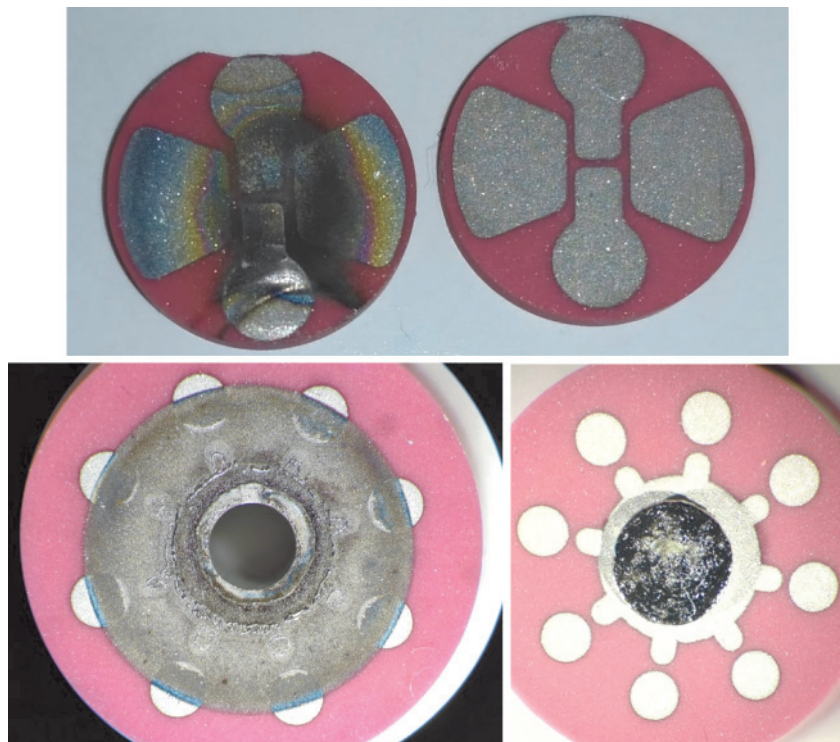


Рис. 4. Образец после испытаний и в исходном состоянии (материал пленки Ti сверху, AMц внизу)



С использованием стенда получены следующие результаты [2]:

- установлено, что уменьшение проводящих свойств пленки после ее отжига носит необратимый характер и чем меньше шероховатость подложки, тем меньше это изменение;
- наибольшей проводимостью обладают пленки из АМц и ковара, которые при толщине 1,5 мкм обеспечивают значения  $4,62 \text{ Ом}^{-1}$  и  $1,21 \text{ Ом}^{-1}$ , соответственно;
- на основе статистической обработки экспериментальных данных предложены уравнения регрессии, позволяющие с заданной точностью предсказывать значения толщины пленок широкой номенклатуры материалов исходя из требований к их поверхностной проводимости.

Перспективными пленочными электродными системами могут считаться композиции на базе электрически эрозионностойких материалов. В работе [1] приведены результаты экспериментальных исследований эрозии различных материалов электродов, имеющих различный химический состав и различную кристаллическую структуру. Отмечена невозможность выбора конкретного эрозионно-стойкого материала, ввиду отсутствия доминирующего механизма эрозии. Однако, среди чистых металлов как наиболее устойчивые к эрозии выделяются вольфрам (W), молибден (Mo), медь (Cu), титан (Ti), хром (Cr). Подчеркивается перспективность использования гетерогенных композиций металл – неметалл типа систем Me – MeC, Me – MeN или Me – Me(C, N) (где Me – металл из следующего ряда: Ti, V, Cr, Ni, Zr, Nb, Mo, Ta).

Результаты исследований [3] показывают, что для образования дугового разряда в вакууме, инициированного поджигающим искровым разрядом по поверхности диэлектрика, где в качестве диэлектрика используется керамика на базе оксида алюминия, ионизации газовых включений в порах диэлектрика может быть недостаточно для обеспечения перехода разряда в режим короткого замыкания, и тогда недостаток заряженных частиц в канале тока может быть возмещен только за счет эрозии материала электрода. В этой связи повышенная эрозионная стойкость пленочного электрода может приводить к уменьшению доли эмитируемых частиц и к нестабильности инициирования разрядов. Немаловажным фактором остается обеспечение необходимой прочности сцепления подложки и многослойной композиции, которая может быть повышена за счет использования промежуточного слоя.

Перспективной эрозионностойкой системой может быть многослойная композиция, имеющая структуру подслоя – проводящий слой – эрозионный слой, где каждый слой обеспечивает выполнение определенных требований.

Планируется проведение комплекса исследовательских работ, направленных на поиск материалов многослойных пленочных покрытий, предназначенных для изготовления элементов электродных систем миниатюрных разрядников нового поколения и обеспечивающих высокую степень работоспособности разрядников.

### Список литературы

1. Кулаева М.В. Исследование и разработка модели процесса эрозии материала электродов, как подсистемы САПР приборов нестационарного дугового разряда: Автореферат дис. – Северо-Кавказский гос. технологич. ун-т, 1998.
2. Давыдов С.Г., Максимов В.А., Ревазов В.О., Якубов Р.Х. Исследование поверхностной проводимости тонкой металлической плёнки, сформированной на диэлектрической подложке // В кн.: Труды 15-й Международной конференции «Пленки и покрытия-2021». – СПб: Изд-во ООО «РПК «АМИГО-ПРИНТ», 2021. – С. 128–132.
3. S.G. Davydov, A.N. Dolgov, A.A. Kozlov, V.A. Maksimov, R.Kh. Yakubov. Optical diagnostics of a dielectric surface discharge in the triggered vacuum gap using various dielectric materials // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. –Т. 2059. – №.1. – С. 012006.

## Исследование режимов работы малогабаритных ионных источников Пеннинга в условиях воздействия внешних магнитных полей

д.т.н. **С.П. Масленников**, И.М. Мамедов

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ – Москва, Россия

В работе представлены результаты исследований зависимости амплитудно-временных характеристик ионных источников от величины и конфигурации магнитного поля. На основании полученных данных предложены варианты построения магнитных систем нейтронных трубок, обеспечивающие повышение стабильности работы нейтронных генераторов в условиях воздействия внешних магнитных полей.

## Study of the Operating Regimes of Small-sized Penning Ion Sources in Conditions of Exposure to External Magnetic Fields

Dr. **S.P. Maslennikov**, I.M. Mamedov

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute) – Moscow, Russia

The paper presents the study results of the dependence of ion sources amplitude-time characteristics on magnitude and configuration of magnetic field. On the base of received data the variants of neutron tube magnetic system are proposed, which provide an increase in the stability of neutron generator operation in conditions of exposure to external magnetic fields.

Среди различных типов ионных источников, применяемых в нейтронных трубках, широкое распространение получили источники с разрядной ячейкой Пеннинга. Условия зажигания и характеристики разряда Пеннинга изменяются в зависимости от геометрии электродной системы, параметров систем импульсного питания и формирования магнитного поля, состава и давления рабочего газа. Практика эксплуатации аппаратуры нейтронного каротажа показывает, что одной из возможных причин нарушения условий работы нейтронных генераторов является внешнее магнитное воздействие. Магнитное поле с напряженностью в сотни Эрстед в скважинах может создаваться локальными намагниченностями обсадных колонн, аномалиями магнитных полей в соединительных муфтах [1, 2]. В работе представлены результаты исследований влияния внешних магнитных источников на амплитудно-временные характеристики малогабаритных ионных источников Пеннинга, применяемых в аппаратуре для геофизических исследований скважин.

Исследования проведены на лабораторном стенде, позволяющем воспроизводить режимы работы нейтронных трубок в условиях эксплуатации каротажных приборов. Стенд оснащен системой датчиков для измерения импульсных напряжений и токов на электродах ионных источников (ИИ). Для создания аксиально-симметричного магнитного поля (различной величины и конфигурации) в ИИ применялись постоянные кольцевые магниты и цилиндрические токовые катушки. Условия работы ИИ в неоднородных магнитных полях воспроизводились за счет осевого смещения магнитной системы относительно центра разрядной ячейки [3, 4]. Опытные образцы нейтронных трубок подключались к вакуумной системе стенда, а их наполнение рабочим газом (дейтерий) в диапазоне давлений 0,1–10 мТорр осуществлялось с

помощью встроенного хранилища газа (геттера) [3–5]. В работах [1, 6] приведено подробное описание исследованных нейтронных трубок и использованных в них ИИ. Система питания стенда построена на основе твердотельного генератора, обеспечивавшего формирование импульсов с амплитудой до  $U_a = 3$  кВ и частотой следования  $F = 1 - 10$  кГц [7].

Исследование режимов работы ИИ проведены для различных вариантов расположения внешних магнитов вблизи корпуса каротажного прибора (рис. 1). Варианты I и II соответствуют условиям, когда намагненность внешнего магнита одинаково или противоположно направлена по отношению к вектору индукции собственного поля ИИ  $B_{z0}$  на оси ИИ. Для вариантов III и IV внешние магниты создавали радиально направленное магнитное поле.

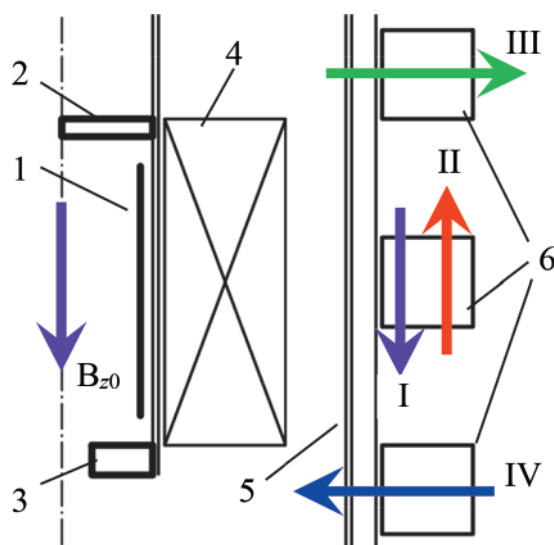


Рис. 1. Варианты размещения внешних магнитов:

1 – анод; 2 – катод; 3 – антикатод; 4 – магниты ИИП; 5 – корпус генератора; 6 – внешний магнит

На рис. 2 представлены зависимости  $B_z(z)$ , полученные по результатам измерений индукции поля на оси ИИ (отдельные точки), формируемого собственной магнитной системой без внешних возмущающих воздействий ( $B_{z0}$ ) и при различных вариантах расположения внешних магнитов (I–IV). Сплошными линиями обозначен диапазон распределения магнитного поля со стабильным режимом работы ИИ [3, 4]. Представленные данные наглядно отражают вносимые искажения в распределение  $B_z(z)$  под влиянием внешних магнитных источников.

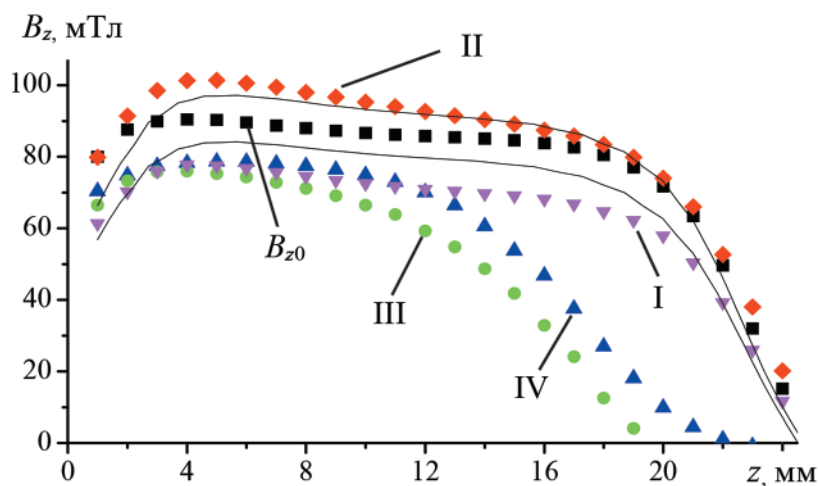


Рис. 2. Распределения магнитного поля в ионном источнике



На рис. 3 представлены результаты измерений амплитудных значений тока разряда Пеннинга в зависимости от давления газа при различном магнитном окружении нейтронной трубки. Результаты показали, что магнитные источники, оказавшиеся вблизи корпуса каротажного прибора, искажали магнитное поле в ИИ и вызывали нарушения режимов его работы. Наиболее выраженный эффект влияния внешнего поля наблюдался при его поперечном направлении и воздействии на ИИ в области катода. В этих условиях зажигание разряда происходило в диапазоне повышенных давлений, фиксировалось кратное снижение амплитуды разрядного тока.

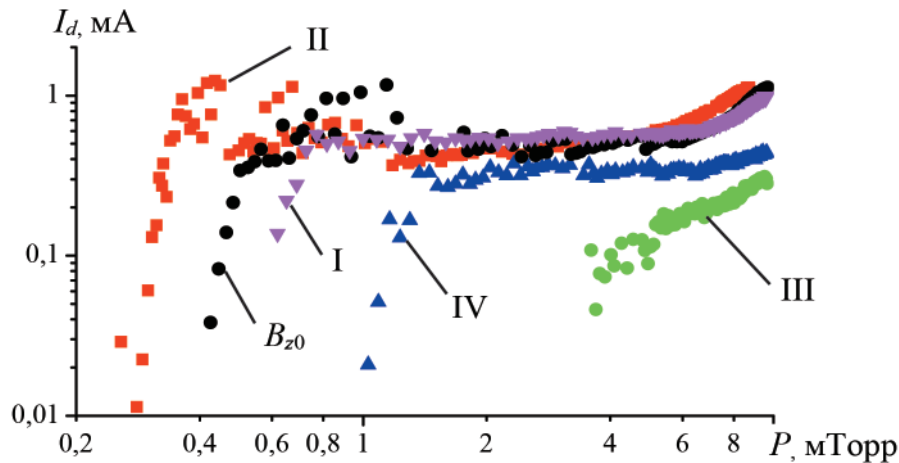


Рис. 3. Зависимости тока разряда от давления при отсутствии и наличии внешнего «паразитного» магнитного поля

На рис. 4 представлены формы импульсов разрядного тока в ИИ в условиях его работы без возмущающих воздействий и при различных положениях внешнего магнита. Измерения проведены при следующих режимах работы ИИ:  $U_a = 2$  кВ,  $t_u = 30$  мкс,  $F = 10$  кГц,  $P = 4$  мТорр. Представленные данные показывают, что под влиянием внешнего поля увеличивалось время задержки зажигания разряда, изменялись форма и амплитуда токовых импульсов. Наибольшее запаздывание инициирования разряда происходило при поперечном магнитном воздействии в области катода: задержка зажигания разряда при этом превышала 25 мкс.

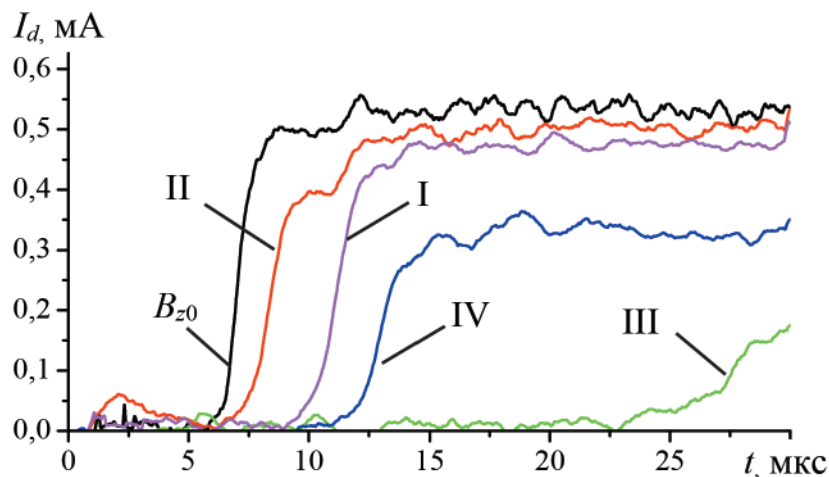


Рис. 4. Импульсы тока разряда при внешнем магнитном воздействии

Для снижения влияния внешних магнитных источников на режимы работы ИИ требуется применение дополнительных экранов. Ввиду малых внешних габаритных размеров аппаратуры для геофизических исследований экранирующие элементы располагаются в непосредственной близости от магнитной системы нейтронной трубки и оказывают собственное влияние на распределение магнитных полей в ИИ. Это требует, в частности, коррекции параметров используемых систем формирования магнитного поля в ИИ.

По результатам исследований были предложены варианты построения экранированных магнитных систем нейтронных трубок, обеспечивающие повышение стабильности работы нейтронных генераторов в условиях воздействия внешних магнитных полей. В одном случае в качестве экранирующего элемента использован внешний корпус каротажного прибора из стали 30ХГСА. В другом варианте магнитной системы применен дополнительный цилиндрический экран ИИ из стали 10864.

### Список литературы

1. R.S. Rachkov, A.Y. Presnyakov, D.I. Yurkov / *At. energ.* – V. 126. – №6. – P. 334–337.
2. Р.С. Рачков, А.Ю. Пресняков / *Яд. физ. инжинир.* – 2016. – Т. 7 – №2. – С. 162–167.
3. N.V. Mamedov, S.P. Maslennikov, A.A. Solodovnikov et al. / *Plasma Phys. Rep.* – V.46 – Is.2. – 2020 – P.217–229 – DOI: 10.1134/S1063780X20020063.
4. N.V. Mamedov, A.V. Gubarev, V.I. Zverev et al. / *Plasma Sources Sci. Technol.* – 2020 – №2 – p.1–9 – (29 (2020) 025001) – DOI: 10.1088/1361-6595/ab6758.
5. Н.В. Мамедов, С.П. Масленников и др. / *ЖТФ* – 2019. – Т. 64. – №9. – С. 1367–1374.
6. Н.В. Мамедов, Н.Н. Щитов и др. / *ЖТФ* – 2018. – Т. 88. – №8. – С. 1164–1171 DOI: 10.21883/JTF.2018.08.46304.2396.
7. S.P. Maslennikov, A.S. Serebryakova / *J. of Commun. Technol. and Electr.* – 2018. – №63 (1). – P. 71–74.

## **Влияние собственных магнитных полей электронных пучков на их транспортировку в мощных многолучевых клистродах**

**А.А. Матвеев**, д.т.н. С.П. Масленников, И.С. Кузнецов, В.М. Саблин, Д.А. Терентьев

АО «НПП «Торий» – Москва, Россия

В работе приведены результаты трехмерного моделирования транспортировки электронных пучков в многолучевых клистродах с учетом собственных магнитных полей в магнитных фокусирующих системах с однонаправленным и периодическим магнитными полями. Рассмотрена методика, позволяющая оценить амплитуду собственного магнитного поля и степень отклонения электронного пучка в однонаправленном магнитном поле с учетом собственного магнитного поля электронов.

## **The Effect of the Self-magnetic Fields of Electron Beams on Their Transportation in High-power Multibeam Klystrons**

**A.A. Matveev**, Dr. S.P. Maslennikov, I.S. Kuznetsov, V.M. Sablin, D.A. Terentev

Research and Production Enterprise "Toriy" – Moscow, Russia

The paper presents the results of three-dimensional modeling of electron beam transport in multibeam klystrons taking into account self-magnetic fields in magnetic focusing systems with unidirectional and periodic magnetic fields. A technique is considered that makes it possible to estimate the amplitude of the self-magnetic field and the degree of deflection of an electron beam in a unidirectional magnetic field, taking into account the self-magnetic field of electrons.

### **Введение**

Развитие вакуумной электроники привело к увеличению тока электронного пучка с целью повышения выходной мощности приборов. При проектировании электронно-оптических систем (ЭОС) сверхмощных многолучевых клистронов, формирующих интенсивные электронные пучки высоких энергий, необходим учет не только электрических, но и магнитных полей, создаваемых электронным потоком. Ввиду небольшого диаметра расположения пролетных каналов и высокого уровня токов в многолучевых клистродах, собственные магнитные поля каждого из электронных пучков влияют друг на друга. [1] Суперпозиция этих собственных магнитных полей приводит к формированию азимутально направленного отклоняющего магнитного поля, что для некоторых ЭОС является принципиальным ограничением получения удовлетворительного токопрохождения, в особенности ЭОС с протяженными пролетными каналами [2].

### **Постановка задачи**

В качестве примера была рассмотрена однорядная многолучевая ЭОС с расположенными по азимуту парциальными пучками. Параметры ЭОС системы показаны в табл. 1.

Основная задача работы – с помощью компьютерного моделирования провести расчет электронной пушки, соответствующей заданным характеристикам, а также произвести расчет магнитной фокусирующей системы (МФС) с однонаправленным магнитным полем на основе соленоида и магнитной реверсивной фокусирующей системы (МРФС) на основе постоянных

магнитов. Оценить влияние собственного магнитного поля электронного пучка на формирование электронного потока в ЭОС.

Таблица 1

Характеристика ЭОС

Ускоряющее напряжение	115 кВ
Количество лучей	30
Ток катода	9,5 А
Микропервеанс	$0,24 \text{ A} \cdot \text{В}^{-3/2}$
Коэффициент заполнения	$0,5 \pm 0,05$
Радиус катода	4 мм
Радиус пролетного канала	4 мм

### Расчет ЭОС в однонаправленном магнитном поле

Оценим с помощью формулы (1), какое требуется минимальное магнитное поле (бриллюэновское поле) для фокусировки электронного пучка:

$$B_0 = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{\sqrt{2}PU}{\pi\epsilon_0\eta^{3/2}}} \quad (1)$$

Бриллюэновское поле для такой конфигурации ЭОС составляет 800 Гс. Расчет траекторий электронов производился в программе трехмерного моделирования, использующей метод конечных элементов для решения магнитостатической, электростатической и смешанных задач.

Решением магнитостатической задачи является график распределения магнитного поля вдоль оси канала ЭОС, изображенный на рис. 1.

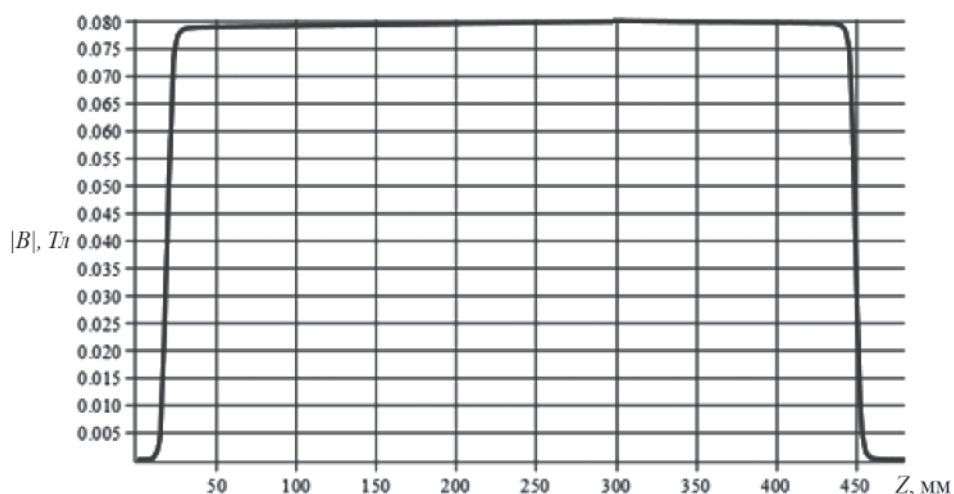


Рис. 1. График распределения модуля продольной индукции магнитного поля на оси пролетного канала фокусирующей системы

Решением смешанной задачи, в которой происходит расчет электронного потока в магнитном и электрических полях, являются рассчитанные траектории электронного потока в пролетном канале с учетом и без учета собственного магнитного поля, изображенные на рис. 2.

Коэффициент токопрохождения без учета собственного магнитного поля составил 100%, а с учетом – 79%.

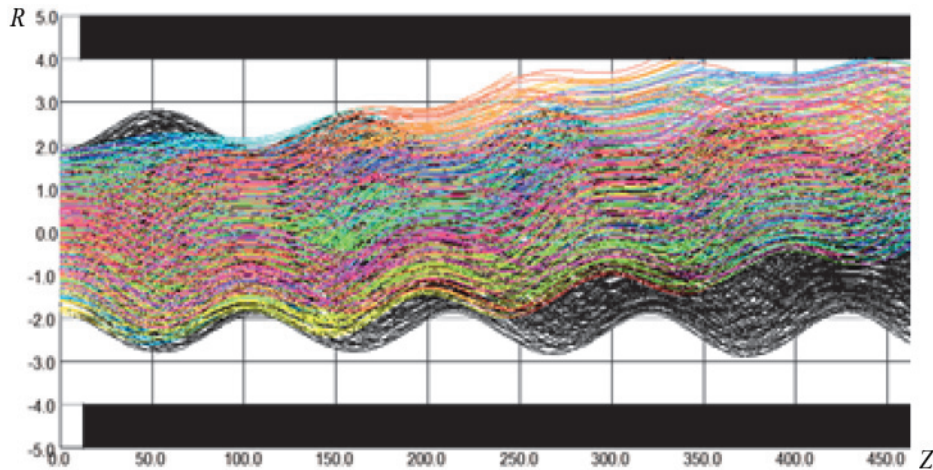


Рис. 2. График траекторий электронов в пучке без учета (черный цвет) и с учетом собственного магнитного поля пучка (цветные). Черный прямоугольник – область пролетного канала

Оценить влияние собственного магнитного поля на электронные пучки можно с помощью следующей аналитической методики. Магнитное поле имеет как продольную  $B_z$ , так и азимутальную  $B_\theta$ , следовательно, силовая линия является винтовой с углом закручивания  $\text{tg}\gamma_0 = \frac{B_\theta}{B_z}$ .

Соответствующий циклотронный радиус траектории  $R_m = \frac{v_z \text{tg}\gamma_0}{\eta B_z}$ . Ввиду малой величины циклотронного радиуса электрон будет двигаться практически по силовой линии магнитного поля, но сама эта линия будет наклонена по отношению к оси. Так как все силовые линии поворачиваются на один и тот же угол  $\gamma_0$ , то и осевые линии пучков должны повернуться на тот же угол. На длине  $L$  этот поворот даст смещение  $\Delta m = L \text{tg}\gamma_0 = L \frac{B_{\theta\Sigma}}{B_z}$ . Оценим с помощью данной методики амплитуду магнитного поля и отклонение электронного пучка от оси симметрии пролетного канала. Суммарное действие собственных магнитных полей электронных пучков численно равняется 8,34 Гс, а их отклонение под действием данного фактора изображено на рис. 3.

Оценить влияние собственного магнитного поля на электронные пучки можно с помощью следующей аналитической методики. Магнитное поле имеет как продольную  $B_z$ , так и азимутальную  $B_\theta$ , следовательно, силовая линия является винтовой с углом закручивания  $\text{tg}\gamma_0 = \frac{B_\theta}{B_z}$ . Соответствующий циклотронный радиус траектории  $R_m = \frac{v_z \text{tg}\gamma_0}{\eta B_z}$ . Ввиду малой величины циклотронного радиуса электрон будет двигаться практически по силовой линии магнитного поля, но сама эта линия будет наклонена по отношению к оси. Так как все силовые линии поворачиваются на один и тот же угол  $\gamma_0$ , то и осевые линии пучков должны повернуться на тот же угол. На длине  $L$  этот поворот даст смещение  $\Delta m = L \text{tg}\gamma_0 = L \frac{B_{\theta\Sigma}}{B_z}$ . Оценим с помощью данной методики амплитуду магнитного поля и отклонение электронного пучка от оси симметрии пролетного канала. Суммарное действие собственных магнитных полей электронных пучков численно равняется 8,34 Гс, а их отклонение под действием данного фактора изображено на рис. 3.

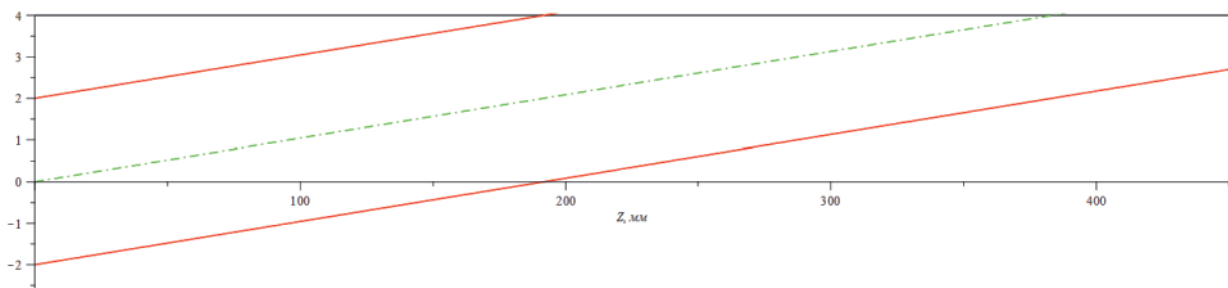


Рис. 3. Отклонение электронного луча под действием суперпозиций собственных магнитных полей. Красная линия – контур пучка, зеленая линия – центр электронного пучка

### Расчет ЭОС в периодическом магнитном поле

Решением магнитоэлектростатической задачи является распределение магнитного поля вдоль оси канала ЭОС, изображенное на рис. 4.

Решением смешанной задачи, в которой происходит расчет электронного потока в магнитном и электрических полях, являются рассчитанные траектории электронного потока в пролетном канале с учетом и без учета собственного магнитного поля, изображенные на рис. 5.



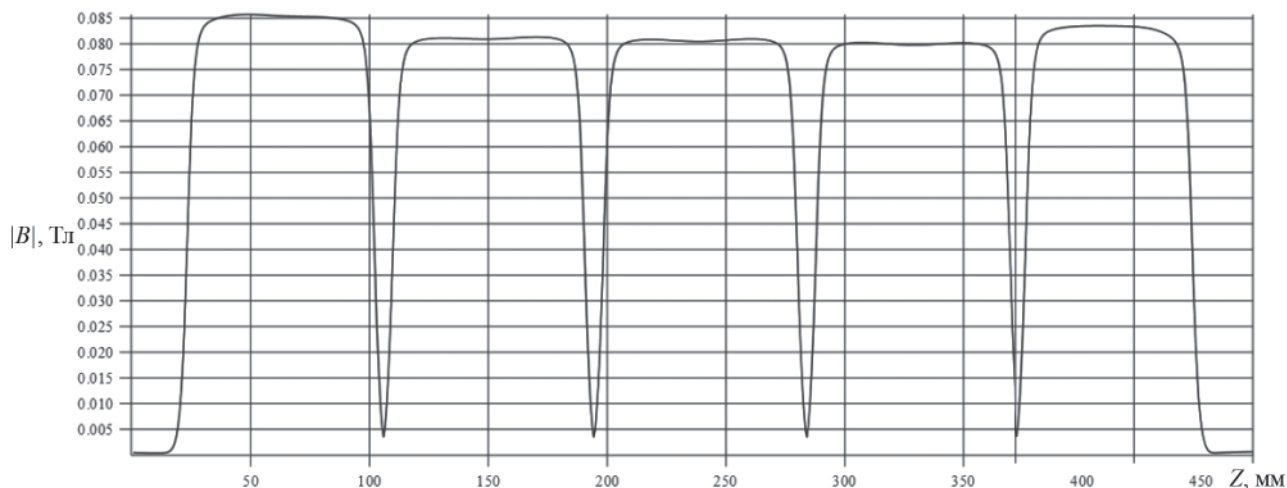


Рис. 4. График распределения модуля продольной индукции магнитного поля на оси пролетного канала фокусирующей системы

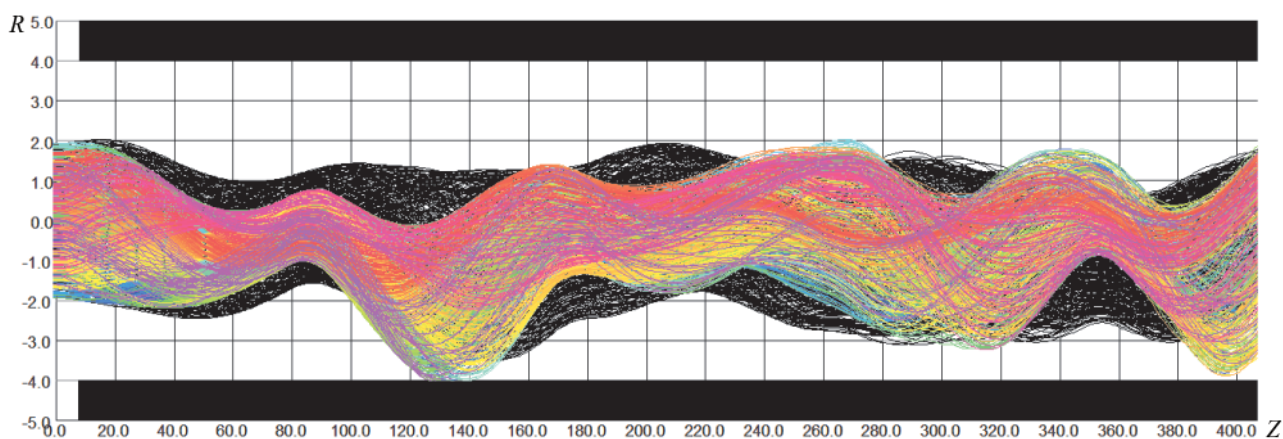


Рис. 5. График траекторий электронов в пучке без учета (черный цвет) и с учетом собственного магнитного поля пучка (цветные). Черный прямоугольник – область пролетного канала

Коэффициент токопрохождения без учета собственного магнитного поля составил 100%, а с учетом – 99%. Коэффициент токопрохождения в периодической системе фокусировки электронного потока выше, чем при фокусировке с однонаправленным магнитным полем, поэтому можно предположить, что в многолучевых клистронах с высокими уровнями токов и небольшим диаметром расположения пролетных каналов периодические системы фокусировки имеют преимущества перед системами с униполярным полем.

### Выводы

В ходе проектирование ЭОС мощных многолучевых клистронов необходимо учитывать не только магнитные и электрические поля ЭОС, но и собственные магнитные поля, создаваемые электронными потоками. В многолучевых клистронах с протяженными пролетными каналами и высоким током электронных пучков собственное магнитное поле является ограничивающим фактором, влияющим на коэффициент токопрохождения.

### Список литературы

1. Беломытцев С.Я. Физика сильноточных пучков заряженных частиц: Учебное пособие / С.Я. Беломытцев, И.В. Пегель. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 115 с.
2. Цимринг Ш.Е. Введение в высокочастотную вакуумную электронику и физику электронных пучков. – 2012.

## Результаты исследований и разработок материалов для регистрации нейтронных потоков в широком энергетическом диапазоне

**И.В. Мосягина**, О.В. Ивкина, М.А. Шарипова, д.т.н. С.Б. Чебышов

АО «СНИИП» – Москва, Россия

В докладе представлены результаты исследований и разработок в области создания новых детекторов нейтронов на основе термолюминесцентных, сцинтилляционных полимерных и композиционных материалов, а также актинид-оксидных радиаторов. Предложен новый подход к формированию структуры детектирующего материала для эксплуатации в экстремальных условиях.

## Results of Research and Development of Materials for Detection of Neutron Fluxes in a Wide Energy Range

**I.V. Mosyagina**, O.V. Ivkina, M.A. Sharipova, Dr. S.B. Chebyshov

JSC "SNIIP" – Moscow, Russia

The report presents the results of research and development in the field of creating new neutron detectors based on thermoluminescent, scintillation polymer and composite materials, as well as actinide-oxide fission materials. A new approach to the formation of the structure of the detecting material for operation in extreme conditions is proposed.

### Введение

В текущем 2022 году исполняется 90 лет со дня открытия нейтронов, а работы по созданию новых материалов для их детектирования не теряют своей актуальности. Основные принципы регистрации нейтронов были заложены вскоре после их открытия, и в настоящее время принятая классификация остается актуальной.

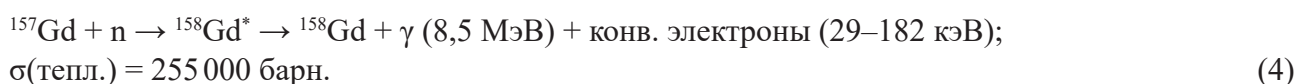
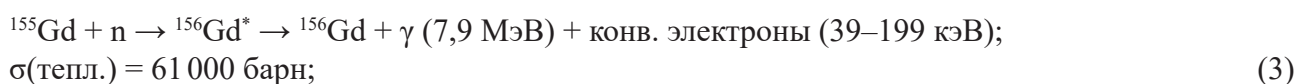
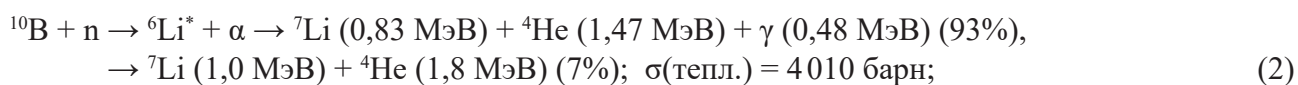
Область интересов в нашей работе лежит в регистрации тепловых ( $E=0,025$  эВ), промежуточных ( $E=1\dots 100$  кэВ) и быстрых ( $E=0,1\dots 20$  МэВ) нейтронов. Для детектирования тепловых нейтронов наиболее распространенным методом является использование материалов с высоким сечением реакции  $(n,\alpha)$ , в результате которой образующиеся продукты реакции затем регистрируются ионизационным, сцинтилляционным или др. методом. Регистрация промежуточных нейтронов происходит после их замедления до тепловой энергии. Быстрые нейтроны наиболее эффективно регистрируются методом ядер отдачи, за счет высоких сечений упругого взаимодействия быстрых нейтронов с протонами среды.

Практическое внедрение для регистрации нейтронов в широком (от тепловых до быстрых энергий) диапазоне получила серия устройств, основанная на изобретении 1960 года под названием «Сфера Боннера» [1, 2]. Метод был описан в 1960 г. Р. Брамблеттом, Юингом и Т. Боннером и основан на использовании детекторов тепловых нейтронов, расположенных в замедляющих шаровых элементах различного диаметра и, соответственно, с различной толщиной замедлителя (парафина). В качестве детекторов наибольшее распространение получили сцинтилляционные элементы на основе состава  $(ZnS:Ag + \text{полиметилметакрилат (ПММА)})$  и гелиевые счетчики. Диапазон измерения подобного устройства составляет величину от 0,025 эВ до 20 МэВ.

Посредством математической обработки сигналов с каждого детектора производится восстановление исходного спектра нейтронов. На сегодняшний момент устройства на основе сфер Боннера являются единственными практически внедренными приборами, обеспечивающими получение спектральной картины нейтронного потока.

### Постановка задачи

Основной идеей, реализуемой в рамках нашей работы, стало использование различных сцинтилляторов для селективного детектирования тепловых, промежуточных и быстрых нейтронов. Для регистрации тепловых нейтронов используются (n, $\alpha$ )-реакции (1,2) на ядрах  $^{10}\text{B}$ ,  $^6\text{Li}$ , а также (n, $\gamma$ )-реакции (3,4) на ядрах изотопов гадолиния:



Для регистрации быстрых нейтронов методом протонов отдачи основным условием является использование водородосодержащей матрицы. В нашей работе исследованы полистирол, ПММА, поликарбонат, каучук СКТН. В качестве люминесцентных добавок рассмотрены составы, перечень которых приведен в табл. 1.

Таблица 1

Перечень люминофоров, использованных в работе

№ п/п	Сокращенное наименование	Состав	$\lambda$ высвечивания, нм	Время высвечивания, нс
1	ФС-4	ZnS:Ag	450	10 000
2	РС-424	Sr <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> :Eu	430	5 000
3	РС-450	ZnS:Ag,Co,Ni	460	200
4	РС-453	CaB <sub>5</sub> O <sub>9</sub> Cl:Eu	460	1000
5	РТР	C <sub>18</sub> H <sub>14</sub>	335	1,2
6	PBD (2,5-дифенил-1,3,4-оксадиазол)	C <sub>20</sub> H <sub>14</sub> N <sub>2</sub> O	360–356	1,2
7	РОРОР (1,4-бис (5-фенил-2-оксазолил) бензол)	C <sub>24</sub> H <sub>16</sub> N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	415–417	1,5
8	РРО, DPO (2,5-дифенилоксазол)	C <sub>15</sub> H <sub>11</sub> NO	365	1,6
9	бис-MSB (1,4-бис (2-метилстирил) бензол)	C <sub>24</sub> H <sub>22</sub>	420	1,2

Основным условием для обеспечения возможности последующего разделения суммарного сигнала является подбор сцинтилляционных элементов с различными временами высвечивания.

В смешанном нейтронном потоке:

– регистрация тепловых нейтронов осуществляется детектирующим элементом ДМ-1, например, состава «ПММА + (ZnS +  $^6\text{LiF}$ )»;

– регистрация быстрых нейтронов – детектирующим элементом ДМ-2 состава «полистирол + РТР + Sr<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>:Eu»;

– регистрация промежуточных нейтронов производится после их замедления в слое полиэтилена детектирующим элементом ДМ-3.

В качестве ДМ-3 рассмотрены составы «полистирол+Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+PBO+POPOP», «ПММА+ZnS:Ag,Co,Ni+<sup>6</sup>LiF» и «ПММА+CaB<sub>5</sub>O<sub>9</sub>Cl:Eu+<sup>6</sup>LiF».

### Экспериментальные результаты

Полученные счетные характеристики экспериментальных образцов при облучении источниками ионизирующих излучений (далее – ИИИ) приведены в табл. 2. Использованные ИИИ: <sup>137</sup>Cs, активность 1,8·10<sup>4</sup> Бк; <sup>90</sup>Sr+<sup>90</sup>Y, активность 1,5·10<sup>3</sup> Бк; <sup>239</sup>Pu-Be, поток 5·10<sup>5</sup> нейтрон/с.

Таблица 2

Счетные характеристики экспериментальных образцов ДМ

№ п/п	Образец	Состав	Собственный фон, имп./с	<sup>90</sup> Sr+ <sup>90</sup> Y, имп./с	<sup>137</sup> Cs, имп./с	Нейтрон
1	ДМ-1	ПММА+(ZnS+ <sup>6</sup> LiF)	0,01	0,62	0,03	452,35
2	ДМ-2	полистирол+PTP+Sr <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> :Eu	0,35	192,78	54,75	970,64
3	ДМ-3-1	полистирол+Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +PBO+POPOP	15,87	442,42	1806,64	2504,57
4	ДМ-3-2	ПММА+ZnS:Ag,Co,Ni+ <sup>6</sup> LiF	0,08	0,12	0,05	256,77
5	ДМ-3-3	ПММА+CaB <sub>5</sub> O <sub>9</sub> Cl:Eu+ <sup>6</sup> LiF	0,07	1,15	0,04	280,09

Отметим, что в качестве ДМ-3-1 была изготовлена серия образцов с различным строением функционального объема: Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> распределен по объему, слой Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> сформирован на поверхности образца и Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> расположен посередине образца. Во всех трех случаях β-, γ-спектры значительно отличаются по своей форме. На рис. 1 для примера приведены β-, γ-спектры образцов со срединным и поверхностным расположением слоя Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

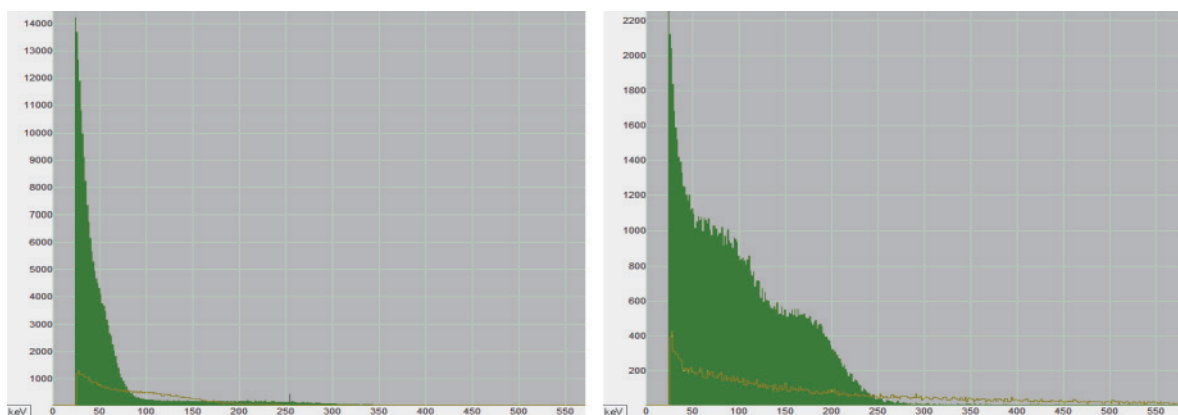


Рис. 1. Спектры образцов ДМ-3-1 со срединным (слева) и поверхностным (справа) расположением слоя Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: основной спектр при <sup>137</sup>Cs, фоновый – <sup>90</sup>Sr + <sup>90</sup>Y

С учетом уровня развития устройств и методов цифровой обработки сигналов представляется необходимым рассмотреть гадолиния и его соединений в качестве детектирующего материала для нейтронов в связи со все возрастающими темпами увеличения дефицита изотопной продукции (<sup>6</sup>Li, <sup>10</sup>B).

### К вопросу о радиационной стойкости материалов

Уникальным детектирующим материалом для селективной регистрации нейтронных потоков различных энергий является радиатор ионизационной камеры деления (ИКД) – нейтрон-делящийся слой на основе оксидов  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и др. Селективный захват быстрых нейтронов (с  $E_n > 1,4$  МэВ) осуществляется четно-четными ядрами, среди которых сравнительно большие сечения деления имеют изотопы  $^{238}\text{U}$  ( $\sigma = 0,942$  барн) и  $^{232}\text{Th}$  ( $\sigma = 0,387$  барн). Ранее [3, 4] было показано, что переход в радиаторных материалах от монослойных (толщиной 1,5 мкм) к полислойным структурам (с организацией межслоевого расстояния 20–30 нм) обеспечивает предотвращение роста нанокристаллитов и тем самым повышает долговечность функционального слоя [5].

Представляется необходимым рассмотреть вопросы долговечности материалов для нейтронного детектирования с точки зрения выполнения неравенства (5):

$$\frac{D}{L^2} \geq (1 - \exp(-\Sigma \cdot x)) \cdot F \cdot S, \quad (5)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии дефекта структуры ДМ,  $L$  – линейный размер до области стока дефектов (свободной поверхности),  $\Sigma$  – сечение взаимодействия с нейтроном,  $F$  – плотность нейтронного потока,  $S$  – площадь детектора.

Правая часть выражения (5) определяет скорость образования радиационно-индуцированных дефектных областей, левая часть – скорость аннигиляции дефектов.

### Заключение

1. С учетом развития систем цифровой обработки сигналов возможно создание действительно новых устройств детектирования и материалов для регистрации нейтронов.
2. Существует возможность использования доступных природных нейтрон-чувствительных элементов взамен дорогостоящих и труднодоступных изотопных продуктов.
3. Разработка новых материалов для детектирования нейтронов требует комплексного подхода, учета различных факторов: от функциональной чувствительности до скорости выгорания функциональных изотопов.
4. Для повышения радиационной устойчивости и долговечности нейтрон-детектирующих материалов необходимо применять технологии полинаслаивания для максимизации возможностей стока радиационно-индуцированных дефектов.

### Список литературы

1. [https://en.wikipedia.org/wiki/Bonner\\_sphere](https://en.wikipedia.org/wiki/Bonner_sphere).
2. <https://gammatech.pro/catalog/204>.
3. Сахаров В.В., Басков П.Б., Мосягина И.В. Квазикомпозитное структурирование ураноксидных радиаторов ионизационных камер деления / Тезисы докладов XIII Международного семинара «Структурные основы модифицирования материалов», ИАТЭ НИЯУ МИФИ, С. 126.
4. P.V. Baskov, S.V. Chebyshov etc. Investigation of possibility of creation of radiation resistance sensors for physical information based on fiber materials // Journal of Physics: Conference Series. 2016. №675, at. 042017.
5. Патент RU 152 036 МПК H01J 47/02 (2006.01). Ураноксидный радиатор ионизационной камеры деления / А.В. Егоров, П.Б. Басков, В.В. Сахаров, И.В. Мосягина, заявл. 26.08.2014, Бюл. №12.



## **Проектирование и реализация программно-аппаратных средств АСКРО в соответствии с актуальными техническими требованиями и задачами мониторинга окружающей среды**

А.С. Гордеев, **Р.А. Насибуллин**, д.т.н. С.Б. Чебышов, И.И. Черкашин

АО «СНИИП» – Москва, Россия

Описание реализации технологических этапов проектирования при создании аппаратуры радиационного контроля окружающей среды с учетом современных требований, предъявляемых к АСКРО, на примере разработки поста радиационного контроля. В докладе представлен процесс создания аппаратуры радиационного контроля от момента сбора исходных данных, проработки идеи проекта до этапа реализации проекта, внедрения в эксплуатацию, на примере разработки поста радиационного контроля. Описаны основные этапы проведенной работы, показана проблематика при проектировании оборудования АСКРО нынешнего поколения, возникшие сложности технического и организационного характера и пути их преодоления. Сделаны выводы по оптимизации производственных процессов с учетом накопленного опыта создания аппаратуры радиационного контроля, и представлены рекомендации по созданию современного технологического оборудования системы контроля радиационной обстановки нового поколения.

## **Design and Implementation of ARMS Software and Hardware in Accordance with Current Technical Requirements and Tasks of Environmental Monitoring**

A.S. Gordeev, **R.A. Nasibullin**, Dr. S.B. Chebyshov, I.I. Cherkashin

JSC "SNIIP" – Moscow, Russia

Description of the implementation of the technological stages of design when creating equipment for radiation monitoring of the environment, taking into account modern requirements for ARMS, using the example of developing a radiation monitoring post. The report presents the process of creating radiation monitoring equipment from the moment of collecting the initial data, developing the project idea to the stage of project implementation, putting it into operation. The main stages of the work carried out are described, the problems in the design of ARMS equipment of the current generation. Conclusions are drawn on the optimization of production processes, taking into account the accumulated experience in creating radiation monitoring equipment, and recommendations are presented on the creation of modern technological equipment for a new generation radiation monitoring system.

### **Введение**

Автоматизированная система контроля радиационной обстановки (АСКРО или система), проектируемая и разрабатываемая в АО «СНИИП» с 2016 г., представляет собой двухуровневую систему программно-технических средств, выполненную на базе современного оборудования в области ядерного приборостроения, для решения задач автоматизированного контроля и мониторинга радиационной обстановки в санитарно-защитной зоне (СЗЗ) – до 3 км и зоне наблюдения (ЗН) – до 30 км вокруг атомной станции (АС).

Условно в АСКРО принято выделять два уровня технических средств: нижний уровень и верхний уровень системы. В основу аппаратуры нижнего уровня входит комплекс постов радиационного контроля (ПРК или постов) в различных исполнениях (павильонного типа, контейнерного или шкафного типа и малогабаритного типа), постов метеорологических или автоматизированных метеорологических станций и передвижная радиометрическая лаборатория (ПРЛ). Варианты исполнения постов приведены исходя из их размещения на промплощадке и вокруг АС в соответствии с техническими требованиями стандарта СТО 1.1.1.01.001.0875-2017 АО «Концерн «Росэнергоатом» по АСКРО (СТО) [1]. Верхний уровень системы состоит из стойки сбора данных (основного и резервного), сервера АСКРО и автоматизированного рабочего места (АРМ) оператора АСКРО, АРМ расчетного прогнозирования и АРМ радиопередачи и приема данных от ТС нижнего уровня системы.

АСКРО строится с использованием принципов сетевой организации и на базе унифицированного комплекса технических средств (ТС) с широким использованием средств современной вычислительной техники и существующих каналов связи. Система АСКРО передает информацию по независимой, самостоятельной линии связи, защищенной от информационных помех, несанкционированного доступа и повреждений. Взаимодействие и обмен информацией между нижними и верхним уровнем системы осуществляется по нескольким резервированным каналам радиосвязи с помощью радиомодемов УКВ-диапазона, GSM/3G(4G) модемов и транкинговой радиосвязи стандарта TETRA. Ниже на рис. 1 приведена упрощенная структурная схема АСКРО.

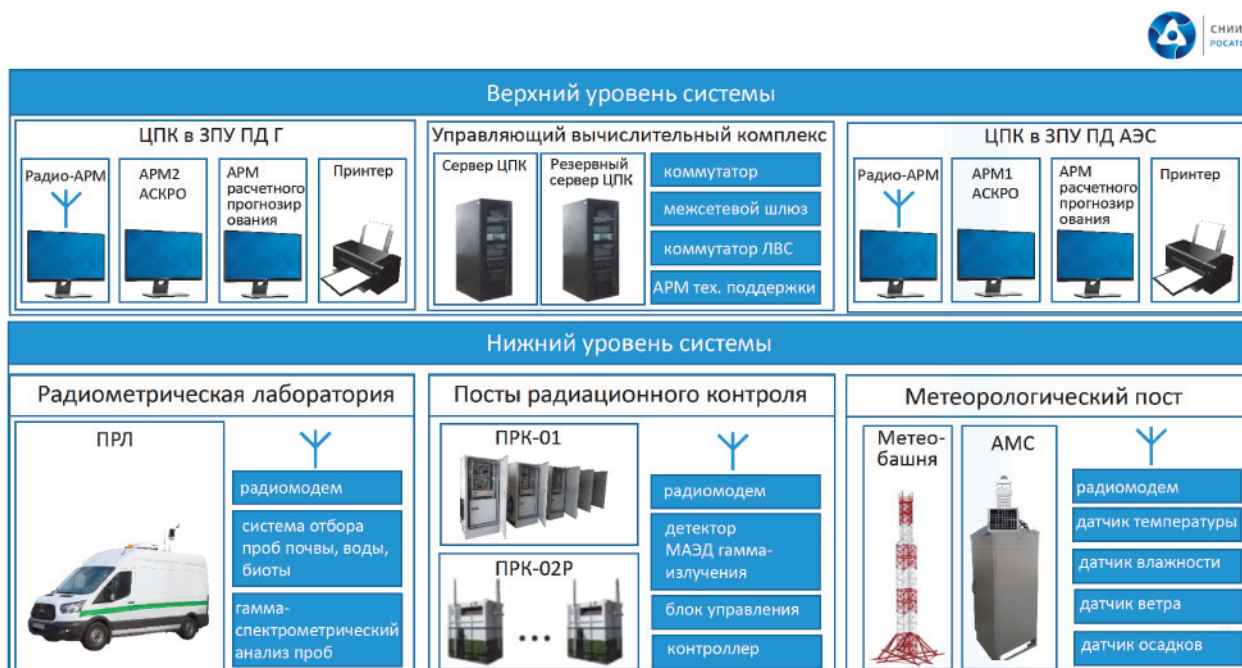


Рис. 1. Структурная схема АСКРО

С помощью программно-технических средств АСКРО решаются ряд задач, важных для безопасности как персонала, так и населения. АСКРО позволяет проводить непрерывные автоматизированные измерения мощности амбиентной эквивалентной дозы гамма-излучения в местах расположения точек контроля (периодичность опроса постов раз в 20 минут в штатном режиме работы и раз 10 минут при аварийной обстановке), измерение метеорологических характеристик атмосферы по десятку параметров (температуры воздуха на нескольких уровнях

высот, температуры приземного слоя атмосферы, значений атмосферного давления, уровня и количества выпадения осадков, силы и направления ветра и т.д.).

Также задачей АСКРО является прогнозирование появления и оперативное обнаружение аномальных изменений радиационной обстановки (РО), оповещение о данных событиях, идентификация и выдача предложений по снижению возникающих радиационных воздействий на население и окружающую среду при возникновении аварийных ситуаций на АС.

### **Этапы проектирования**

Проектирование системы АСКРО начинается с этапа сбора и анализа исходных технических требований к системе, предъявляемых заказчиком. На данной стадии работ разрабатывается и утверждается техническое задание (ТЗ) исполнителем работ в рамках которого будет осуществляться поставка данной системы. В процессе составления ТЗ на АСКРО учитывается ряд требований, прямо или косвенно влияющих на сложность реализации проекта, сроки поставки и приемки работ. В соответствии с новыми отраслевыми требованиями к построению системы, АСКРО с 2017 года относится к классу ЗН по НП-001-15 систем, влияющих на безопасность АС, поэтому к системе с этого момента предъявляются повышенные требования при изготовлении, приемке и поставке. Таким образом, перевод системы из класса оборудования 4 в класс ЗН, применение в составе изделия импортных комплектующих влечет за собой ряд организационных и технических усложнений, таких как:

- изготовление оборудования в составе АСКРО ведется по планам качества (ПК), что подразумевает установление строгой очередности выполнения операций по изготовлению продукции: проверки готовности производства предприятия-изготовителя к началу изготовления, входной контроль комплектующих изделий, входной контроль импортных комплектующих, контроль качества изготовления и сборки, технологическая тряска, технологический прогон, приемочные испытания, приемо-сдаточные испытания, приемочная инспекция с постоянным контролем этапов ПК со стороны отдела управления качеством АО «СНИИП» и предъявление работ на отдельных этапах представителю сторонней специализированной организации, назначаемой АО «Концерном Росэнергоатом» специально под данную поставку;
- разработка и утверждение «Решения о применении импортных комплектующих изделий» – обязательное требование для поставки на АС и является одним из видов оценки соответствия качества продукции;
- обязательной процедурой оценки соответствия является экспертиза документации на поставляемую продукцию, без получения экспертного заключения в дальнейшем невозможно проведение сертификации поставляемых изделий, а наличие сертификата является обязательным требованием при поставках на АС.

Технические сложности могут возникнуть на любой стадии реализации проекта, и для максимально скорого устранения требуется дополнительное время, которого, как показывает опыт, не хватает для поставки в установленные сроки. Поэтому в рамках улучшения качества работы в АО «СНИИП» проводится политика четкого и регламентированного управления проектами с фиксированием ключевых событий и сокращением или недопущением увеличения сроков реализации проекта. Так, для каждого объекта АСКРО на любом уровне определяется необходимая номенклатура и количество технических средств (ТС), входящих в систему. Производится максимальная унификация выявленной номенклатуры и стандартизация необходимых аппаратных решений. И при проектировании элементов АСКРО решаются задачи экономической целесообразности, функционально-технологической эффективности принятых инженерных решений. Совершенствование и расширение эксплуатационных характеристик существующих элементов АСКРО накладывает особые технические сложности при реализации проекта.

Для примера рассмотрим одну из инженерных задач по обеспечению безотказной автономной работы постов АСКРО на объекте при обрыве линии электропитания 220 В в течение 72 часов с учетом максимально жестких условий эксплуатации. Приведем расчет необходимого количества и мощности аккумуляторных батарей, достаточных для поддержания постов АСКРО в работоспособном состоянии в указанный временной интервал.

Примем значения внешних воздействующих факторов на пост АСКРО равными: температура окружающего воздуха минус 50 °С, влажность 80%, атмосферное давление нормальное 101,3 кПа, внутри поста температура не ниже +5 °С.

Занесем в табл. 1 данные по составу и мощности потребления оборудования поста АСКРО с учетом условий его эксплуатации и соответствующих режимов работы оборудования.

Таблица 1

Характеристики оборудования из состава поста АСКР

$i$	Наименование устройства	Кол-во	Мощность потребл., Вт	Работа, часов в сутки	Итого $W_i$ , Вт·ч за 3 суток
1	ИБП ИБЭП-220/24В-24А	1	20,0	24	1440,0
2	Контроллер LP-5231 ICP DAS	1	4,8	24	345,6
3	Модуль ввода-вывода ICP CON M-7055	1	1,6	24	115,2
4	Преобразователь DC/DC TCL 060-112 DC	1	6,0	24	432,0
5	Радиомодем Viper SC+ 100	1	30,0	2	180,0
6	Дозиметр гамма-излучения УДБГ-11Р	1	4,8	24	345,6
7	Термостат TER-3F DC 24V	1	1,0	8	24,0
8	Калорифер NSYCR100WU1C	1	100,0	8	2400,0
9	Счетчик Меркурий 206	1	0,5	24	36,0
	Итого				5321,4

Вычислим нагрузку постоянного тока на аккумуляторы, при условии коэффициента полезного действия преобразователей напряжения 90%, входного напряжения  $U_{вх}$  ИБП при работе от АКБ постоянного тока 24 В, для этого разделим  $W_{наг}$  на  $U_{вх}$  и получим полную токовую нагрузку через АКБ в А·ч за 3 суток. Примем глубину разряда АКБ равной 70% и разделим на нее  $W_{наг}$ , получим значение необходимого запаса энергии в АКБ с учетом разряда:

$$W_{зан} = \frac{\sum W_i}{k_{кнд} \cdot k_{раз} \cdot U_{вх}} = 384,4 \text{ (А·ч)}. \quad (1)$$

Выберем номинальную емкость одного АКБ равной 150 А·ч и напряжение батареи 12 В, и, разделив  $W_{зан}$  на емкость, мы получим число АКБ, соединенных параллельно  $N_{пар}$ , разделив номинальное напряжение поста 24 В на 12 В, получим количество АКБ, соединенных последовательно  $N_{пос}$ :

$$N_{пар} = \frac{W_{зан}}{U_{акб}} = 2 \text{ (ед.)}, \quad N_{пос} = \frac{U_{вх}}{U_{акб}} = 2 \text{ (ед.)}. \quad (2)$$

Таким образом, общее количество необходимых АКБ для такой системы равно произведению  $N_{нар}$  на  $N_{нос}$  и равно 4 ед. После соединения аккумуляторов в единый аккумуляторный блок емкостью 150 А·ч получим  $W_{рас}$ , равное 300 А·ч на 24 В. Посчитаем реальную энергоемкость получившегося аккумуляторного блока, для этого перемножим  $W_{рас}$ ,  $N_{нос}$  и  $N_{нар}$  и получим 5 040 Вт·ч, что с учетом отклонения в 6% процентов покрывает требуемое количество мощности, равное 5 321 Вт·ч, для работы поста в автономном режиме в течение 3 суток.

### Заключение

Приведенная выше оценка технических решений – лишь небольшая задача при проектировании оборудования АСКРО, требующая учета и анализа большого количества исходных данных, начиная от выбора аппаратного обеспечения состава поста, учета внешних воздействующих факторов на работу устройств, анализа исходных требований и нормативной документации к типу разрабатываемого устройства, а также ряда организационных процедур, связанных с закупкой, постановкой на производство, конструированием поста, разработкой документации и в дальнейшем сертификацией оборудования. Поэтому при разработке аппаратуры ядерного приборостроения требуется современный комплексный подход как на этапе проектирования, так и на этапе поставки на производство и эксплуатации, и высокая квалификация инженеров, проектировщиков и разработчиков этих устройств для производства высокотехнологичного конкурентоспособного продукта.

### Список литературы

1. СТО 1.1.1.01.001.0875-2017 Стандарт организации АО «Концерн «Росэнергоатом» / Автоматизированная система контроля радиационной обстановки. Технические требования.



## Моделирование взаимодействия электронов и гамма-излучения с материалом блока детектирования в системах мониторинга объёмной активности инертных радиоактивных газов в аварийных режимах АЭС

д.т.н. С.Б. Чебышов<sup>1</sup>, к.ф.-м.н. Е.В. Рябева<sup>2</sup>, Е.М. Тюрин<sup>2</sup>, **В.О. Небольсин**<sup>1,2</sup>, Р.В. Усков<sup>3</sup>

<sup>1</sup> АО «СНИИП» – Москва, Россия;

<sup>2</sup> Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ – Москва, Россия;

<sup>3</sup> Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН – Москва, Россия

В работе приводятся результаты моделирования измерения объемной активности инертных радиоактивных газов в диапазоне до  $3,7 \cdot 10^{17}$  Бк/м<sup>3</sup>, соответствующего аварийным условиям на АЭС. Учтены вторичные эффекты, возникающие при взаимодействии излучения от измеряемой пробы газов с материалами блока детектирования. Рассмотрены различные варианты конструкционных материалов блока детектирования и детектора. Показана эффективность регистрации ионизирующего излучения при различной геометрии блока детектирования. Приведено описание алгоритма моделирования с применением суперкомпьютера.

## Electrons and Gamma Radiation Interaction Modeling with Detection Unit Materials in the Volume Activity Monitoring Systems During Emergencies at the NPP

Dr. S.B. Chebyshov<sup>1</sup>, PhD E.V. Ryabeva<sup>2</sup>, E.M. Tyurin<sup>2</sup>, **V.O. Nebolsin**<sup>1,2</sup>, R.V. Uskov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> JSC "SNIIP" – Moscow, Russia;

<sup>2</sup> National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute) – Moscow, Russia;

<sup>3</sup> Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences – Moscow, Russia

The report presents the results of modeling the measurement of the volumetric activity of inert radioactive gases in the range up to  $3.7 \cdot 10^{17}$  Bq/m<sup>3</sup>, corresponding to emergency conditions at a NPP. The secondary effects arising from the interaction of radiation from the measured gas sample with the materials of the detection unit are taken into account. Various options for construction materials of the detection unit and detector are considered. The efficiency of registration of ionizing radiation is shown for different geometry of the detection unit. A description of the simulation algorithm using a supercomputer is given.

### Введение

В соответствии с принятыми многими странами планами [1] по переходу к безуглеродной энергетике до 2050 года, развитию доли экологически чистых источников энергии и отнесению атомной энергетике к таковым [2] задача обеспечения безопасности радиационных объектов остается одной из ключевых. Атомные станции (далее – АЭС) являются одними из наиболее технически сложных объектов и поэтому наиболее требовательны к многоуровневому контролю эксплуатационных пределов параметров технологических процессов для обеспечения безопасности при выработке электроэнергии.

В соответствии с [3, 4] системы мониторинга выбросов инертных радиоактивных газов (далее – ИРГ) предназначены для измерения радиоактивности газообразных выбросов в атмосферу во время аварий и после них на АЭС. Для современных проектов АЭС российского дизайна, таких как проект АЭС-2006 с реакторами типа ВВЭР-1200, при проектировании определяются значения активности ИРГ, в том числе для аварийных режимов. На рис. 1 представлены предварительные результаты расчетного анализа аварийного выброса при тяжелой аварии с разрывом дыхательного трубопровода компенсатора давления с отказом активных систем аварийного охлаждения активной зоны.

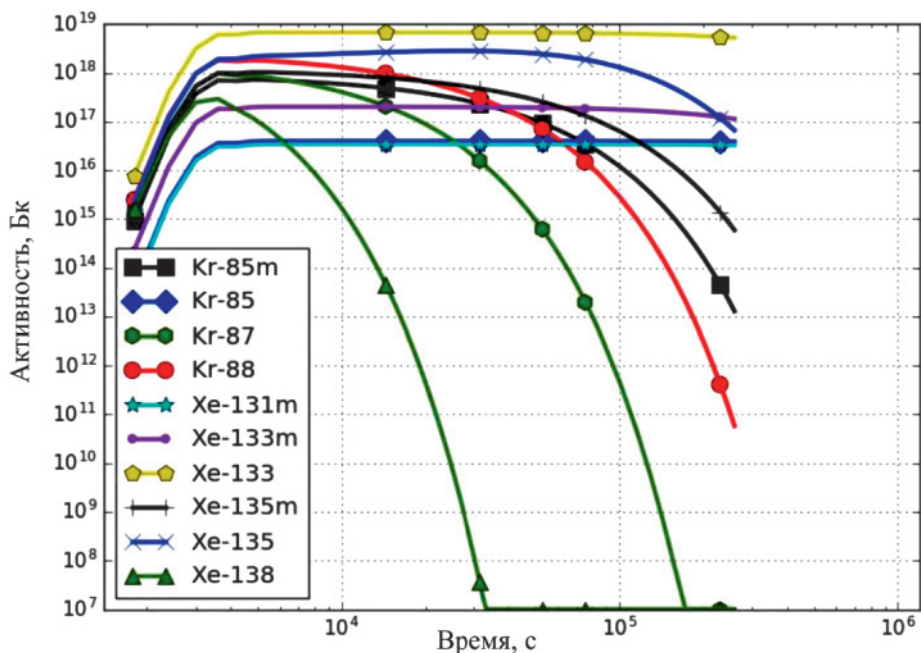


Рис. 1. Содержание в воздушном объеме гермооболочки изотопов группы ИРГ

Приведенные на рис. 1 значения показывают, что критически важной задачей контроля объемной активности (далее – ОА) является выбор диапазонов и методики измерения ОА до  $3,7 \cdot 10^{17}$  Бк/м<sup>3</sup> для обеспечения оператора АЭС достоверной информацией о состоянии физических барьеров АЭС во время и после аварии. При этом актуальным направлением является разработка современных средств контроля с применением такой методики.

### Выбор варианта построения измерительного канала ОА ИРГ

При разработке каналов измерения ОА ИРГ наибольшие трудности возникают при обеспечении измерений в начале диапазона (диапазон низких концентраций порядка  $10^3$  Бк/м<sup>3</sup>), а также при измерениях, когда ОА ИРГ находится в области значений, характерных для аварийной обстановки ( $10^7 - 10^{17}$  Бк/м<sup>3</sup>). Особенности измерения низких концентраций ИРГ в данной работе не рассматриваются.

С учетом факторов, влияющих на работу систем мониторинга ИРГ и имеющихся промышленных образцов детекторов на рынке, целесообразно для построения измерительного канала для регистрации ОА ИРГ в диапазоне  $3,7 \cdot 10^7 - 3,7 \cdot 10^{17}$  Бк/м<sup>3</sup> применить ППД на основе кремния, имеющий приемлемые значения параметров по быстродействию, эффективности регистрации, энергетическому диапазону и доступности. Указанный диапазон активности не может быть измерен одним детектором. По этой причине нужно обеспечить синхронизацию работы минимум двух детекторов и перекрытие диапазонов их измерения минимум на один порядок. Толщина детектора должна быть такой, чтобы создать достаточный по амплитуде сиг-

нал от регистрации электронов от источника излучения, так и минимизировать возникающий при взаимодействии вторичного гамма-излучения с материалами измерительного канала. Так, 1 мм толщины кремния обеспечит поглощение электронов энергией 850 кэВ [5]. Эскиз макета блока детектирования с учетом описанного подхода его построения и исследуемого в рамках настоящей работы приведен на рис. 2.

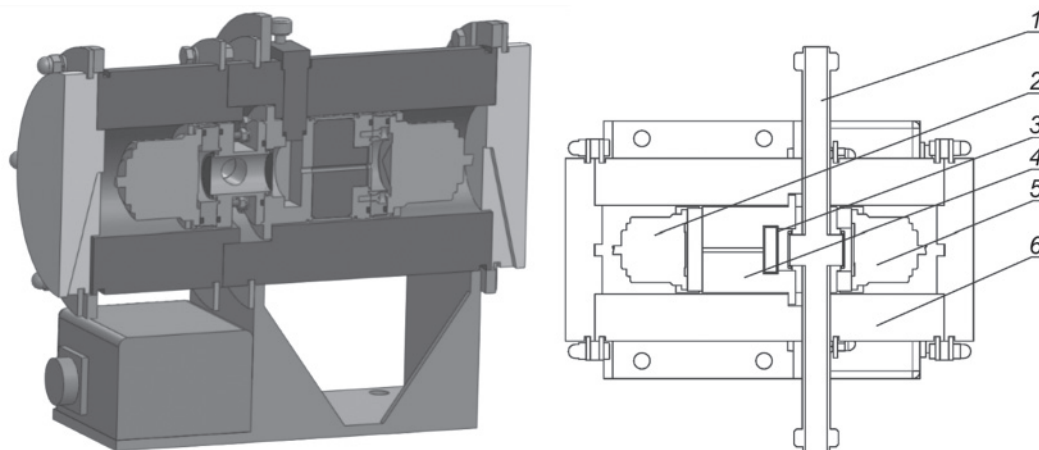


Рис. 2. Эскиз макета блока детектирования в разрезе, где 1 – газовый тракт, 2 – узел детектора второго детектора, 3 – задвижка с поверочным источником, 4 – коллиматор, 5 – узел второго детектора, 6 – защита

### Моделирование измерения АО ИРГ

В связи с необходимостью моделирования взаимодействия излучения от ИРГ со сложными многокомпонентными объектами измерительного канала, имеющими в своем составе разнообразные структуры, вытекает потребность решения сложных граничных задач теории переноса. Моделирование соответствующих процессов может быть эффективно проведено только на современных многопроцессорных суперкомпьютерах [6].

В связи с большим числом моделируемых событий ( $10^{17}$  в единицу времени) моделирование осуществлялось на вычислительном кластере К-100 в ИПМ им. М.В. Келдыша. Применяемые в рамках настоящей работы алгоритмы, по крайней мере, на 2 порядка быстрее по сравнению с расчетом с помощью MCNP. При этом результаты аналогичных расчетов показали удовлетворительное согласие с результатами, полученными с использованием пакета MCNP [7].

В основе модели в настоящей работе заложена концепция гибридного распараллеливания алгоритмов моделирования каскадных процессов переноса излучения. Для каждой отдельной частицы были смоделированы процессы ее взаимодействия с другими частицами в объеме камеры с ИРГ, с материалом стенок камеры и коллиматора, а также детектора. Для приближения модели к реальной ситуации в модели были учтены эффекты рождения вторичных частиц за счет рассеивания гамма-излучения и рождения потока быстрых электронов, а также возникновения тормозного излучения и повторного рождения электронов.

Задача теории переноса заключается в вычислении показаний детектора  $J$ , помещенного в поле излучения. Искомые величины представляют как показания некоторого детектора и записывают в виде функционалов от решения уравнения переноса

$$J = \int Q(x)D(x)dx. \quad (1)$$

$D$  определяется типом искомой (измеряемой) величины. Рассматриваются такие регистрирующие устройства (детекторы), показания которых  $J$  равны сумме вкладов отдельных столкновений частиц в чувствительном объеме детектора (аддитивные детекторы). Такие

детекторы для решения задачи настоящей работы были размещены на поверхности детектора за камерой, торца камеры, на входе в коллиматор, выходе из него и на детекторе за коллиматором.

Условное изображение геометрии взаимного расположения камеры с ИРГ и детекторов приведено на рис. 3.

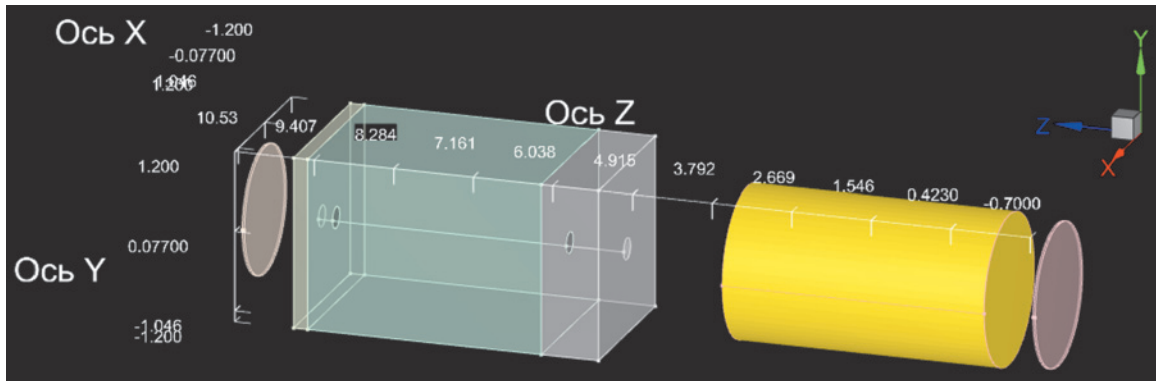


Рис. 3. Геометрия модели, где 1 – детектор, 2 – камера с ИРГ, 3, 5 – стальная пластина крепления коллиматора, 4 – коллиматор, 6 – детектор

С учетом информации по составу выбросов ИРГ на АЭС и информации о параметрах радионуклидов ИРГ [8] для моделирования были определены  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{133}\text{Xe}$  и  $^{41}\text{Ar}$ . Для выбора параметров коллиматора и камеры с ИРГ были проанализированы различные геометрии и материалы.

### Выводы

Результаты моделирования показали целесообразность применения кремниевого детектора. Измерительный канал на его основе показал работоспособность в аварийных условиях и полях излучения от ИРГ активностью до  $3,7 \cdot 10^{17}$  Бк/м<sup>3</sup>. Для повышения эффективности регистрации необходимо минимизировать ослабление бета-излучения путем замены материала торца камеры с ИРГ на, например, полиэтилен. Дальнейшее развитие результатов работы целесообразно проводить в направлении проверки эффективности применения полупроводниковых детекторов другого типа, например, CdTe.

### Список литературы

1. European Green Deal: Commission proposes transformation of EU economy and society to meet climate ambitions. European Commission. [Online] [Cited: 09 18, 2021.] [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP\\_21\\_3541](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_21_3541).
2. The energy sector has a lot at stake in the EU Fit for 55 package. Fortum. [Online] [Cited: 09 18, 2021.] <https://www.fortum.com/about-us/forthedoers-blog/energy-sector-has-lot-stake-eu-fit-55-package>.
3. IAEA Safety Glossary. Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection. Vienna: IAEA, 2007. P. 14.
4. IEC 60761-1. Equipment for continuous monitoring of radioactivity in gaseous effluents. Part 1: General requirements. Введ. 2002-01. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2002.
5. Abhilasha Singh, Xavier Mougeot, Benoit Sabot, Didier Lacour, Abdel-Mjid Nourreddine. / Experimental study of  $\beta$  spectra using Si detectors. – 2020. – EPJ Web of Conferences 239, 02001.
6. М.Е. Жуковский, Р.В. Усков. / Моделирование взаимодействия гамма-излучения с веществом на гибридных вычислительных системах. – 2011. – Т. 23. – №2. – С. 20–32.
7. М.Е. Жуковский, С.В. Подоляко, Р.В. Усков. / Модель индивидуальных соударений для описания переноса электронов в веществе. – 2011. – Т. 23. – №6. – С. 147–160.
8. В.Т. Самосадный, С.Б. Чебышов. / Разработка методов и технических принципов построения ТС ИРГ с расширенным диапазоном измерений и повышенной точностью. – 00-3-024-1574.

## Определение углерода в почве методом меченых нейтронов

к.ф.-м.н. В.Ю. Алексахин<sup>1,2</sup>, **Е.А. Разинков**<sup>1</sup>, Ю.Н. Рогов<sup>1,2</sup>, д.ф.-м.н. М.Г. Сапожников<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> ООО «Диамант» – Дубна, Россия;

<sup>2</sup> Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ) – Дубна, Россия

В докладе будут рассмотрены результаты определения концентрации углерода в почве методом меченых нейтронов в ходе испытаний прототипа мобильной установки АПП-С.

## Determination of Carbon Concentration in Soil by Tagged Neutron Method

PhD V.Yu. Alexakhin<sup>1,2</sup>, **E.A. Razinkov**<sup>1</sup>, Yu.N. Rogov<sup>1,2</sup>, Dr. M.G. Sapozhnikov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> LCC «Diamant» – Dubna, Russia;

<sup>2</sup> Joint Institute for Nuclear Research (JINR) – Dubna, Russia

The results of determination of carbon concentration in soil by tagged neutron method during lab tests of prototype set-up AGP-C are shown.

Оценка концентрации углерода в почве является актуальной задачей для проблемы улавливания атмосферного углерода. Чтобы оценить способность почв накапливать углерод, необходимо разработать прецизионные методы, позволяющие проводить измерения содержания углерода в почве в полевых условиях.

Стандартный подход к определению концентрации углерода в почве требует большого и трудоемкого отбора проб, их подготовки и последующего химического анализа. Технология метода меченых нейтронов (ММН) позволяет проводить дистанционный элементный анализ почвы в режиме реального времени.

Работы проводились с прототипом установки для определения элементного состава почвы АПП-С. В его состав входили портативный нейтронный генератор ИНГ-27 со встроенным 9-пиксельным  $\alpha$ -детектором, система из  $\gamma$ -детекторов на основе кристаллов BGO, система сбора данных, блок питания детекторов и нейтронного генератора.

Портативный нейтронный генератор ИНГ-27 излучает нейтроны с энергией 14,1 МэВ. Измерения производились при интенсивности нейтронного генератора  $I = 2,5 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$ . Встроенный кремниевый  $\alpha$ -детектор представлял собой матрицу  $3 \times 3$  с размером пикселя  $10 \times 10$  мм, расположенную на расстоянии 62 мм от тритиевой мишени.

Для регистрации  $\gamma$ -квантов, возникающих при облучении почвы пучком быстрых меченых нейтронов, использовались 6  $\gamma$ -детекторов на основе кристаллов BGO диаметром 76 мм и толщиной 65 мм, в качестве фотоэлектронного умножителя были использованы ФЭУ R6233 фирмы Hamamatsu. Такие детекторы имеют оптимальное соотношение по стоимости и качеству характеристик и хорошо зарекомендовали себя при использовании в установках ММН. Энергетическое разрешение всей системы детекторов составило  $\Gamma_E = (4,42 \pm 0,14) \%$  на линии 4,44 МэВ. Временное разрешение системы ( $\alpha$ - $\gamma$ )-совпадений, усредненное по всей совокупности  $\gamma$ -детекторов, составило  $\Gamma_t = 4,82 \pm 0,12 \text{ нс}$ .

На рис. 1 показано распределение сигналов  $\gamma$ -квантов при облучении образца нейтронным генератором со встроенным  $\alpha$ -детектором. Спектр набран в окне совпадений 60 нс, которое открывается в момент прихода  $\alpha$ -частицы. Видно, что за это время приходят случайные  $\gamma$ -кванты



от окружающих объектов, они дают полку случайных совпадений. Затем приходят  $\gamma$ -кванты от объекта исследований, они образуют ярко выраженный пик, который может в несколько раз превосходить амплитуду полки случайных совпадений.

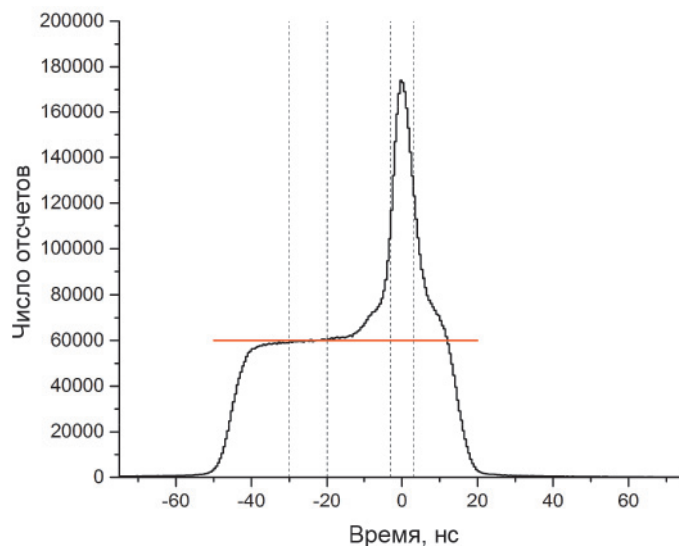


Рис. 1. Временное распределение, набранное в окне совпадений 60 нс; пунктирной линией слева выделена область полки случайных совпадений шириной 10 нс, пунктирной линией справа выделена область пика, ширина 6 нс (сформирован  $\gamma$ -квантами от образца)

На рис. 2 показаны энергетические спектры, соответствующие области пика с шириной временного окна 6 нс и области полки случайных совпадений с шириной 10 нс.

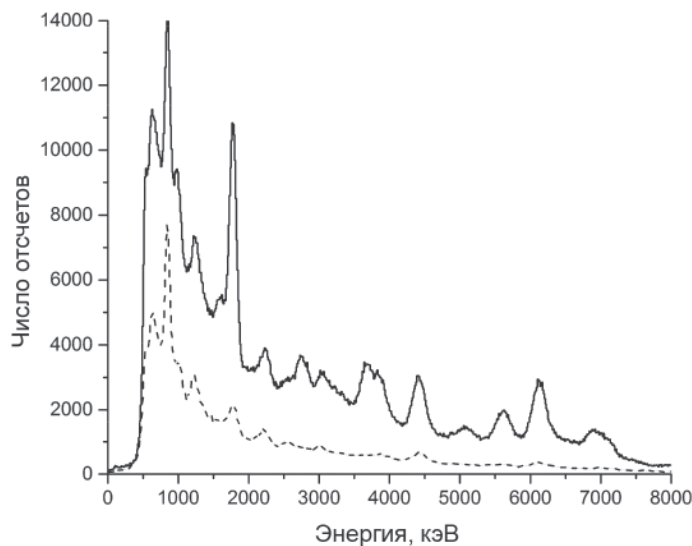


Рис. 2. Энергетический спектр  $\gamma$ -квантов, соответствующий сигнал + фон, показан сплошной линией; энергетический спектр  $\gamma$ -квантов, соответствующий фону, показан пунктирной линией

Обработка спектров проводилась по методике, которая была подробно изложена в [1–2].

Гамма-спектр каждого образца раскладывался на отдельные составляющие путем подгонки его суммой опорных гамма-спектров от 9 элементов, которые были измерены предварительно. В качестве базовых элементов, необходимых для описания спектра почвы, были выбраны Al, C, Ca, Fe, Mg, Na, O, P, Si.

Энергетический спектр гамма-квантов от облучения образца быстрыми нейтронами с энергией примерно 14 МэВ представляется в виде суммы спектров отдельных гамма-линий, спектров континуума и спектра фона:

$$F(E) = \sum_j N_j \left( \sum_{i=1}^{i=n_j} \sigma_{ij}(E) P_{ij}(E) + R_j^{Cont} F_j^{Cont}(E) \right) + BG(E), \quad (1)$$

где  $N_j$  – параметр, определяющий содержание элемента  $j$  в образце, данный параметр пропорционален числу атомов элемента в образце и является единым для всех гамма-линий  $i$  элемента  $j$ ;  $n_j$  – количество гамма-линий  $i$  у элемента  $j$ ;  $\sigma_{ij}(E)$  – сечение рождения гамма-квантов с энергией  $E$ , соответствующей гамма-линии  $i$ , при взаимодействии нейтрона с элементом  $j$ ;  $P_{ij}$  – функция отклика гамма-детектора, соответствующая гамма-линии  $i$  элемента  $j$ ;  $F_j^{Cont}(E)$  – амплитуда спектра континуума, который наблюдается при высоких энергиях возбуждения практически для всех ядер, кроме легчайших;  $R_j^{Cont}$  – нормировочный коэффициент для спектра континуума;  $BG(E) = Ae^{-BE}$  – функция фона,  $A$  и  $B$  – параметры фита.

Для построения надежной градуировочной характеристики было измерено 8 проб с разными значениями концентрации углерода, составленных из песка и сахарного песка в различных пропорциях. Масса каждой пробы составляла 30 кг, содержание сахарного песка было подобрано таким образом, чтобы массовая доля углерода в пробе менялась от 0,5 до 10%. Измерения проводились в режиме 3×30 мин.

На рис. 3 показаны результаты измерений градуировочных проб, а также градуировочная зависимость (прямая линия).

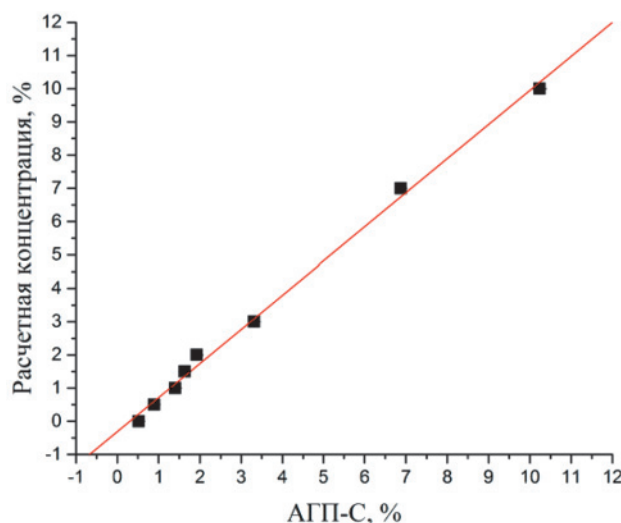


Рис. 3. Результаты измерений градуировочных проб, ошибки по оси  $X$  не превышают размеров маркера.

По оси  $X$  отложены результаты измерений установки. По оси  $Y$  – расчетные концентрации углерода.

Прямой линией показана градуировочная характеристика

Полученные результаты хорошо аппроксимировались простой линейной функцией со следующими параметрами:

$$Y = (1,03 \pm 0,03) \cdot X - (0,31 \pm 0,12), \quad (2)$$

где  $X$  – результаты измерений установки ММН;  $Y$  – расчетные значения массовой концентрации углерода.

Разброс градуировочных данных характеризуется среднеквадратичным отклонением  $СКО=0,2\%$ , расчет  $СКО$  производился по следующей формуле:

$$СКО = \sqrt{\frac{\sum_i (X_i - Y_i)^2}{n}}, \tag{3}$$

где  $n$  – число градуировочных проб,  $X$  – значение массовой концентрации элемента в случае АПП-С для  $i$ -й пробы,  $Y$  – значение расчетной массовой концентрации элемента для  $i$ -й пробы.

Для определения возможностей аппаратуры были определены точности измерения в смысле повторяемости. Для этого пробы измерялись 12 раз по 30 мин.

В табл. 1 показаны значения абсолютного ( $\sigma_r$ ) и относительного ( $\sigma_r^{omh}$ ) стандартного отклонения повторяемости измерений, рассчитанные по формулам (4) и (5).

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{\sum_i (C_i - C)^2}{n - 1}}, \tag{4}$$

$$\sigma_r = 100\% \cdot \frac{\sigma_r}{C}, \tag{5}$$

где  $n$  – число измерений,  $C$  – среднее значение массовой концентрации элемента по всем измерениям,  $C_i$  – значение массовой концентрации элемента в  $i$ -измерении.

Таблица 1

Значения абсолютного ( $\sigma_r$ ) и относительного ( $\sigma_r^{omh}$ ) стандартного отклонения повторяемости измерений

Проба	Элемент	Среднее содержание, %	$\sigma_r$ , %	$\sigma_r^{omh}$ , %
1	Собщ	3,3	0,16	4,7
	O	52,01	0,45	0,9
	Si	44,65	0,29	0,6
2	Собщ	1,7	0,12	6,9
	O	52,62	0,65	1,2
	Si	39,23	0,63	1,6

Таким образом, показано, что прототип мобильной установки может измерять массовую концентрацию углерода в почве с абсолютной погрешностью в смысле повторяемости порядка 0,2%, а массовую концентрацию Si – порядка 0,5%.

### Список литературы

1. Оценка возможности определения элементного состава горных пород с помощью метода меченых нейтронов, препринт ОИЯИ, P14-2015-52, 2015.
2. Alexakhin V.Y. et al, Determination of the elemental composition of geological rocks and minerals by the method of tagged neutrons. 23-rd International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei: Fundamental Interactions & Neutrons, Nuclear Structure, Ultracold Neutrons, Related Topics (ISINN-23). Dubna, Russia, May 25–29, 2015.

## Развитие аппаратуры контроля объёмной активности жидких сред АО «СНИИП»

**А.В. Редкоус**, А.А. Иванов, А.В. Калинин, В.Р. Минниханов, М.К. Савельев, М.Д. Дерябина

АО «СНИИП» – Москва, Россия

В докладе представлен сравнительный анализ устройств радиационного контроля жидких сред, подробно рассмотрены устройства детектирования разработки АО «СНИИП» различных поколений, в том числе модернизируемых и разрабатываемых в рамках инвестиционных проектов. В статье представлены устройства контроля объёмной активности жидких сред погружным, проточным и бесконтактным способом, рассмотрены актуальные требования к контролю объёмной активности жидких сред, в т.ч. по реперному радионуклиду  $^{24}\text{Na}$ , описано начало работ над устройством для удовлетворения указанных требований. Отдельное внимание в докладе уделено рассмотрению дальнейших перспектив развития аппаратуры контроля объёмной активности жидких сред.

## Development of Equipment for Monitoring the Volumetric Activity of Liquid Media JCS "SNIP"

**A.V. Redkous**, A.A. Ivanov, A.V. Kalin, V.R. Minnikhanov, M.K. Saveliev, M.D. Deryabina

JCS "SNIP" – Moscow, Russia

The report presents a comparative analysis of radiation monitoring devices for liquid media, the detection devices developed by JCS "SNIP" of various generations, including those being modernized and developed within the framework of investment projects, are considered in detail. The article presents devices for monitoring the volumetric activity of liquid media by immersion, flow and contactless methods, discusses current requirements for monitoring the volumetric activity of liquid media, including reference radionuclide  $^{24}\text{Na}$ , describes the beginning of work on the device to meet these requirements. Special attention in the report is paid to the consideration of further prospects for the development of equipment for monitoring the volumetric activity of liquid media.

Контроль объёмной активности (далее – ОА) жидких сред на объектах с атомными энергетическими установками является важным критерием оценки влияния работы этих объектов на окружающую среду и показателем их технического состояния, также контроль ОА жидких сред дает представление о радиационной обстановке как непосредственно на объектах использования атомной энергии, так и за их пределами.

Аппаратура для радиационного контроля ОА жидких сред применяется на атомных электростанциях для решения широкого класса задач, начиная от контроля теплоносителя первого контура и далее до мониторинга остаточной активности воды в сбросном канале. Само оборудование подразделяется по методу контроля на проточные, погружные и бесконтактные устройства детектирования. В статье представлены программно-аппаратные средства разработки АО «СНИИП», предназначенные для решения упомянутых выше задач.

В табл. 1 приведены технические характеристики устройств детектирования (далее – УД) контроля ОА жидких сред проточным методом, представленные на рынке. Информация об устройствах взята из открытых источников и актуальна на день публикации, однако, учитывая постоянно ужесточающиеся требования к объёму радиационного контроля, следует иметь в виду, что производители постоянно совершенствуют свою продукцию, улучшая метрологические и эксплуатационные характеристики устройств.

Таблица 1

Устройства детектирования контроля ОА жидких сред проточным методом различных производителей

УД	Тип детектора	Диапазон измерений ОА, Бк/м <sup>3</sup>	Диапазон регистрируемых энергий, МэВ	Погрешность, не более, %
УДЖГ-35Р АО «СНИИП»	Пластиковый сцинтиллятор	$3,7 \cdot 10^3 \div 3,7 \cdot 10^7$	0,01 ÷ 3	30
УДЖГ-20Е ФГУП «ПСЗ»	NaI(Tl)	$2,0 \cdot 10^3 \div 3,0 \cdot 10^8$	0,3 ÷ 1,5	35
УДЖГ-211 НПП «Радио»	NaI(Tl)	$3,7 \cdot 10^4 \div 3,7 \cdot 10^9$	0,15 ÷ 3	30
УДГП-01 НПП «Доза»	CsI(Tl)	$4,0 \cdot 10^2 \div 4,0 \cdot 10^8$	0,05 ÷ 1,5	20

Для контроля ОА жидких сред в продуктовой линейке АО «СНИИП» предусмотрено несколько технических решений: УДЖГ-35Р в проточном исполнении, БДЖГ-13Р в погружном и БДРГ-42Р для бесконтактного контроля, внешний вид которых приведен на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид устройств контроля ОА жидких сред АО «СНИИП»

Из приведенной выше таблицы можно сделать вывод, что УДЖГ-35Р разработки АО «СНИИП», не имея принципиальных конструктивных доработок и модернизаций с двухтысячных годов, по-прежнему обладает достаточными метрологическими и эксплуатационными характеристиками, что обеспечивает его конкурентоспособность среди средств контроля ОА жидких сред. За свою долгую, для технического средства, историю УДЖГ-35Р зарекомендовало себя как надежное устройство, соответствуя всем проектным требованиям, которые предъявлялись ранее для подобных устройств. УДЖГ-35Р является средством измерения утвержденного типа СИ, имеет широкую референтность и применяется на Калининской АЭС, Ростовской АЭС, а также на ПЭБ (плавучем энергоблоке) «Академик Ломоносов». Учитывая длительный положительный опыт эксплуатации устройства, было принято решение о его применении в качестве основного технического средства для контроля ОА жидких сред в составе автоматизированной системы радиационного контроля (далее – АСРК) АЭС «Руппур» в Республике Бангладеш.



Конструкция УДЖГ-35Р представляет собой сцинтиблок, погруженный в сосуд Маринелли, которые размещены в свинцовой защите для снижения внешнего гамма-фона.

Выбор органического сцинтиллятора и его геометрических размеров обусловлен следующими преимуществами:

- малое время высвечивания сцинтиллятора, которое обеспечивает возможность регистрации излучения при высокой нагрузке от высокорadioактивных жидких сред;
- высокая чувствительность, за счет объема, сцинтиллятора позволяет регистрировать низкие значения ОА жидких сред.

Схемотехническим преимуществом УДЖГ-35Р является частотный выход, который подходит для модернизации ранее поставленных АСРК, не предусматривающих подключение УД с цифровым выходом.

Для решения специализированных задач контроля ОА жидких сред погружным способом применяется БДЖГ-13Р. Конструктивным исполнением БДЖГ-13Р является штанга, размеры которой определяются требованием заказчика, с размещённым в ней блоком детектирования. В БДЖГ-13Р применяется пластиковый сцинтиллятор, аналогичный применяемому в УДЖГ-35Р. Диапазон измерения БДЖГ-13Р:  $1,0 \cdot 10^3 \div 1,0 \cdot 10^8$  Бк/м<sup>3</sup>.

Для осуществления бесконтактного способа контроля ОА в технологических трубопроводах АЭС применяется БДРГ-42Р в свинцовой защите, работающий на полупроводниковом детекторе. Диапазон измерения БДРГ-42Р:  $1,0 \cdot 10^8 \div 2,0 \cdot 10^{14}$  Бк/м<sup>3</sup>. БДЖГ-13Р и БДРГ-42Р применены в составе АСРК на Ростовской АЭС и Калининской АЭС.

Ввиду ограничений по применению УДЖГ-35Р и с целью совершенствования продуктовой линейки АСРК последовало решение о разработке новых устройств контроля ОА жидких сред в рамках инвестиционного проекта, реализуемого в АО «СНИИП». Результатом разработки стало устройство детектирования УДЖГ-43Р. К знаниям и опыту предыдущих поколений были добавлены современные подходы решения задач, что позволило предотвратить критические ошибки на этапе макетирования.

Были выполнены работы по части моделирования поведения жидкости в сосуде Маринелли, которые помогли оценить оптимальное расположение патрубков для решения поставленных задач. Также осуществлялось компьютерное SPICE-моделирование аналоговых схемотехнических решений, которое дало возможность рассмотреть вариации параметров схем, уточнить и оптимизировать результаты предварительных расчетов, ускорить срок разработки полностью рабочего устройства, не прибегая к макетированию. Написание встраиваемого ПО велось в современных средах разработки, которые позволили быстро настраивать периферию и помогли ускорить дальнейшую отладку алгоритмов работы устройства.

При разработке УДЖГ-43Р были учтены как преимущества, так и недостатки его предшественника УДЖГ-35Р, в частности:

- в качестве детектора повторно выбран пластиковый сцинтиллятор, благодаря многолетнему опыту успешного применения;
- монолитная защита УДЖГ-35Р заменена на секционированную в УДЖГ-43Р, что увеличивает удобство сборки-разборки, а также транспортирования устройства.

Отличительными особенностями УДЖГ-43Р являются:

- встроенный микроконтроллер, позволяющий без разборки блока детектирования проводить операции по регулировке, настройке и диагностике устройства, а также пересчитывать полученные входные данные в итоговое значение ОА с учётом мёртвого времени детектора;
- цифровой выход с интерфейсом стандарта RS-485, обеспечивающий надежную и устойчивую связь УД с устройствами верхнего уровня;

- электронные узлы, разработанные для УДЖГ-43Р, являются унифицированными и имеют возможность работать в устройствах с другими сцинтилляционными детекторами;
- конструкция блока детектирования унифицирована для применения в проточном и погружном исполнении, что расширяет потенциал применения устройства;
- устройство обработки данных в составе УД, предназначенное для управления устройством и отображения информации в реальном времени.

УДЖГ-43Р предназначается для поставки на строящиеся Курскую АЭС-2 и АЭС «Аккую». Для устройства детектирования УДЖГ-43Р разработан полный комплект конструкторской документации и запущен процесс изготовления опытного образца. В текущем 2022 году планируется проведение приемочных испытаний и испытаний в целях утверждения типа средств измерений с последующим внесением УДЖГ-43Р в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства средств измерений. Все испытания, в том числе испытания в целях утверждения типа, будут проведены на базе аккредитованных лабораторий центра метрологии и испытаний АО «СНИИП» (далее – ЦМИ). Возможности ЦМИ позволяют подтвердить основные метрологические характеристики аппаратуры контроля ОА жидких сред с применением образцовых радиоактивных растворов и твердых образцовых источников. Область аккредитации ЦМИ для радиометров жидкости  $1 \cdot 10^3 \div 1 \cdot 10^{13}$  Бк/м<sup>3</sup>.

В начальной стадии разработки находится устройство контроля ОА жидких сред с функцией измерения реперного радионуклида <sup>24</sup>Na. Необходимость создания подобного устройства продиктована установлением в проектах новых АЭС требований к измерению ОА нуклида <sup>24</sup>Na в системе продувки парогенератора, свидетельствующего о потере герметичности ТВЭЛ. На данный момент для спектрометрического УД выполнены работы по выбору детектора, произведены расчеты и моделирование оптимальной геометрии измерительной емкости с учетом необходимости измерения требуемого диапазона ОА и импульсной загрузки детектора, также произведен расчет геометрии и массы защиты от внешнего гамма-фона.

АО «СНИИП» имеет значительный опыт в разработке устройств детектирования ОА жидких сред, но в условиях необходимости повышения безопасности и технологичности АЭС, строящихся по российским проектам, ключевым является совершенствование УД с применением современных подходов: математического моделирования на различных стадиях разработки, использования современных сцинтилляторов и элементной базы, организации цифровых интерфейсов связи и управления УД. Дальнейшее увеличение точности контроля ОА жидких сред подразумевает взаимодействие и совместные работы с проектными институтами и эксплуатирующими организациями, проведение научных исследований с использованием современных инструментов и сопоставление их результатов с экспериментальными данными, создание новых методик выполнения измерений и их аттестацию.

## Использование метода меченых нейтронов для элементного анализа материалов на конвейере

к.ф.-м.н. В.Ю. Алексахин<sup>1,2</sup>, И.К. Комаров<sup>1</sup>, Е.А. Разинков<sup>1</sup>, **Ю.Н. Рогов**<sup>1,2</sup>,  
д.ф.-м.н. М.Г. Сапожников<sup>1,2</sup>, И.Е. Чириков-Зорин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> ООО «Диамант» – Дубна, Россия;

<sup>2</sup> Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ) – Дубна, Россия

В работе обсуждается применение конвейерного анализатора АГП-К-1 для анализа элементного состава агломерационной шихты. Приводятся результаты работы анализатора и обсуждение полученных данных. Данная работа представляет интерес для горнодобывающих предприятий.

## Application of Tagged Neutron Method for Elemental Analysis of Material on Conveyor

PhD V.Yu. Alexakhin<sup>1,2</sup>, I.K. Komarov<sup>1</sup>, E.A. Razinkov<sup>1</sup>, **Yu.N. Rogov**<sup>1,2</sup>,  
M.G. Sapozhnikov<sup>1,2</sup>, I.E. Chirikov-Zorin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> LCC «Diamant» – Dubna, Russia;

<sup>2</sup> Joint Institute for Nuclear Research (JINR) – Dubna, Russia

Results of operation of conveyor analyzer AGP-K-1 for elemental composition analysis of sintering mixture. The results of analyzer operation and discussion of the results obtained are presented. The work presented is of interest for mining.

Задача контроля состава сырья на конвейере существует на многих производствах. Например, аглодоменное производство контролирует состав агломерата перед отправкой его в доменную печь, чтобы провести коррекции на неоптимальный состав агломерата и рассчитать добавки флюсов и кокса в домне. Это приводит к дополнительным расходам на добавки, дополнительному расходу угля и повышенным выбросам в атмосферу. При этом техническая задержка между приходом материала в агломерационную машину и появлением результатов химического анализа достаточно велика и составляет около 4 часов. Одним из важнейших контролируемых параметров является основность, которая определяется как отношение массовых долей CaO к SiO<sub>2</sub>. Фактическое значение основности не должно отклоняться от целевого более чем на 0,1. Т.к. определение химического состава агломерата – это выявление проблемы постфактум, то имеет смысл корректировать состав шихты, поступающей в агломерационные машины, которые превращают её в агломерат. Основность при переходе шихта-агломерат не меняется, поэтому, корректируя состав шихты в реальном времени, можно получать агломерат с оптимальной основностью. Для решения этой задачи очень хорошо подходит анализатор элементного состава на основе метода меченых нейтронов. Компания ООО «Диамант» создала прибор, основанный на методе меченых нейтронов, определяющий состав шихты перед загрузкой её в агломашины и делающий это в реальном времени.

Суть метода [1, 2] состоит в облучении шихты быстрыми нейтронами с энергией 14 МэВ, которые возникают в бинарной ядерной реакции



Направление вылета нейтрона определяется путем регистрации (мечения)  $\alpha$ -частицы, сопутствующей нейтрону, специальным  $\gamma$ -детектором. Меченые нейтроны, попадая в объект исследования, индуцируют реакции неупругого рассеяния



в результате которых возбуждение ядра снимается испусканием гамма-квантов с энергетическим спектром, характерным для каждого химического элемента. Регистрация характеристического  $\gamma$ -излучения осуществляется  $\gamma$ -детекторами в совпадениях с сигналом от  $\alpha$ -детектора.

Важным преимуществом ММН по сравнению с традиционными методами нейтронного анализа (PGNAA и PFTNA) являются существенно лучшие условия для выделения полезного сигнала, которое достигается за счет сильного подавления фона от окружающей среды. Поскольку гамма-кванты регистрируются только в совпадениях с сигналом от  $\alpha$ -детектора, система сбора данных регистрирует только гамма-кванты, которые индуцированы взаимодействиями меченых нейтронов с изучаемым объектом. В результате отношение сигнал/шум улучшается приблизительно в двести раз. Это приводит к лучшим точностям определения элементного состава.

По сравнению с рентгеновскими методами ММН имеет намного большую проникающую способность. Он позволяет проводить анализ на глубину слоя материала на конвейере до 300 мм. Этим он выгодно отличается от рентгеновских методов, которые дают сведения только об элементном составе поверхностного слоя толщиной в несколько мм.

ММН дает уникальную возможность прямого определения концентрации легких элементов – углерода и кислорода.

Установка АГП-К-1 (рис. 1) состоит из нейтронного модуля (НМ), шкафа электроники (ШЭ) и рабочего места оператора (АРМ).

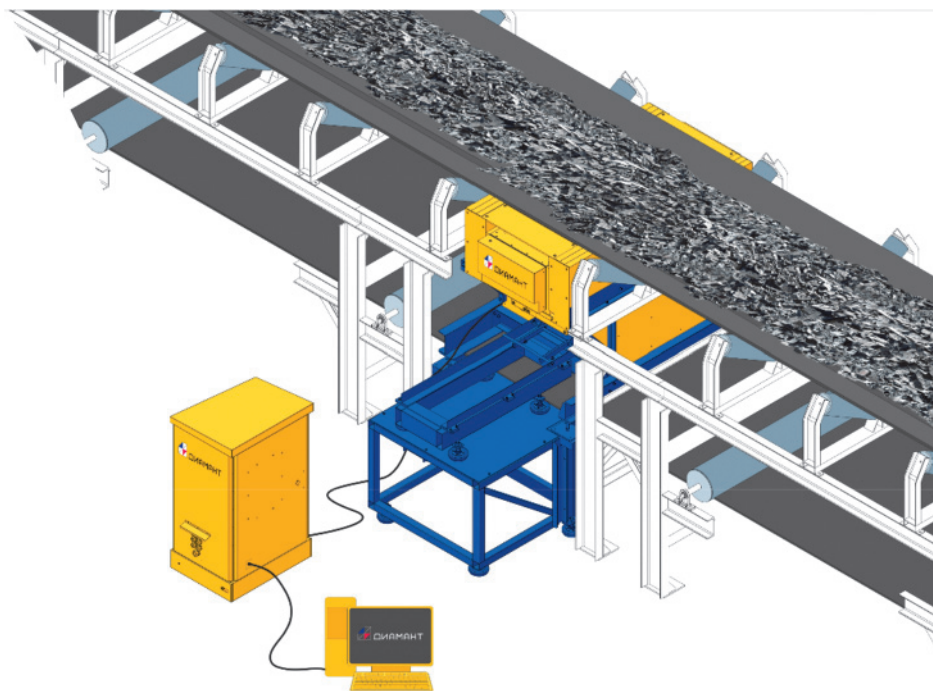


Рис. 1. Общий вид установки АГП-К-1

Нейтронный модуль установлен между прямой и обратной ветвью конвейера и имеет степень защиты IP55. Модуль состоит из нейтронного генератора НГ, термостатированной системы регистрации вторичного  $\gamma$ -излучения, коммутационного блока и биозащиты.

Используется нейтронный генератор со встроенным  $\alpha$ -детектором ИНГ-27 производства ВНИИА им. Духова, Москва. НГ испускает непрерывный поток нейтронов интенсивностью  $I=5 \cdot 10^7$  нейтрон/с. Время жизни составляет 1500 часов, а встроенный  $\alpha$ -детектор представляет собой кремниевый детектор размером  $3 \times 3$  см, разделённый на 9 квадратных пикселей. Предусмотрена возможность оперативной замены отработавших свой ресурс блоков трубки на месте размещения установки.

Система  $\gamma$ -детекторов состоит из двух термостатов по обеим сторонам ленты. В каждом термостате находится по 7  $\gamma$ -детекторов на основе кристалла ВГО диаметром 76 мм и толщиной 65 мм. Такие детекторы имеют оптимальное соотношение по стоимости и качеству характеристик и хорошо зарекомендовали себя при использовании в установках ММН. Энергетическое разрешение всей системы детекторов составило  $\Gamma_E=(4,4 \pm 0,1)\%$  на линии 4,44 МэВ. Временное разрешение системы ( $\alpha$ - $\gamma$ )-совпадений, усредненное по всей совокупности  $\gamma$ -детекторов, составило  $\Gamma_t=3,9 \pm 0,1$  нс. В термостатах поддерживается постоянная температура, что обеспечивает оптимальные условия работы детекторов в условиях сильно меняющейся в течение года температуры в цеху.

Шкаф электроники представляет собой термостатируемый шкаф стандарта IP55, в котором размещены система питания, система управления термостатами  $\gamma$ -детекторов, система сбора данных. ШЭ соединён с АРМ по сети Ethernet.

Графический интерфейс пользователя запускается на АРМ и отображает результаты анализа в настраиваемой форме, а также обеспечивает контроль за работой узлов установки и предоставляет результаты анализа в сеть предприятия.

Восстановление элементного состава основано на том, что вторичное  $\gamma$ -излучение, возникающее после облучения быстрыми нейтронами, уникально для каждого элемента. Полученный спектр исследуемого объекта, т.е. проходящей по конвейеру шихты, представляется в виде суммы вкладов от различных элементов. Определялись массовые концентрации следующих элементов: С, О, Al, Mg, Si, Ca, Fe. Спектры этих элементов были измерены заранее и представлены в виде суммы характерных линий и континуума. Для сравнения с химическим анализом, концентрации химических элементов были пересчитаны в концентрации оксидов  $Al_2O_3$ , MgO,  $SiO_2$ , CaO.

Типичный спектр агломерационной шихты, полученный на установке, показан на рис. 2. Видны пики от железа с энергиями 847 и 1238 кэВ, пик от кремния в районе 1,8 МэВ, пик кислорода с энергией 6,13 МэВ, пик углерода с энергией 4,44 МэВ, а также множество других пиков. Данный спектр раскладывался на компоненты, результаты разложения усреднялись по временному интервалу в 2 часа и сравнивались с данными химического анализа накопительной 2-часовой пробы агломерата. Результаты сравнения показаны на рис. 3. Приведено поточечное сравнение результатов анализа агломерата традиционным способом и анализом с помощью метода меченых нейтронов. Сравняются точки, полученные в течение опытно-промышленных испытаний прибора в мае-июне 2021 года. Видно, что результаты анализа, полученные разными способами, хорошо согласуются.

Также отслеживалось изменение результатов анализа методом меченых нейтронов после управляющих воздействий, изменяющих состав шихты. Было обнаружено, что АГП-К-1 адекватно отслеживает изменения в составе шихты, а время реакции на эти изменения составляет 15–20 минут и складывается из времени движения сырья от бункера до места размещения установки анализатора и времени усреднения данных, производимого анализатором во время работы.

Создана и опробована в условиях реально работающего аглодоменного производства установка АГП-К-1, основанная на методе меченых нейтронов и предназначенная для определения элементного состава агломерационной шихты в реальном времени. Установка показала свою



надёжность и работоспособность в условиях реального производства. Результаты анализа шихты с помощью метода меченых нейтронов и результаты химического анализа агломерата хорошо согласуются.

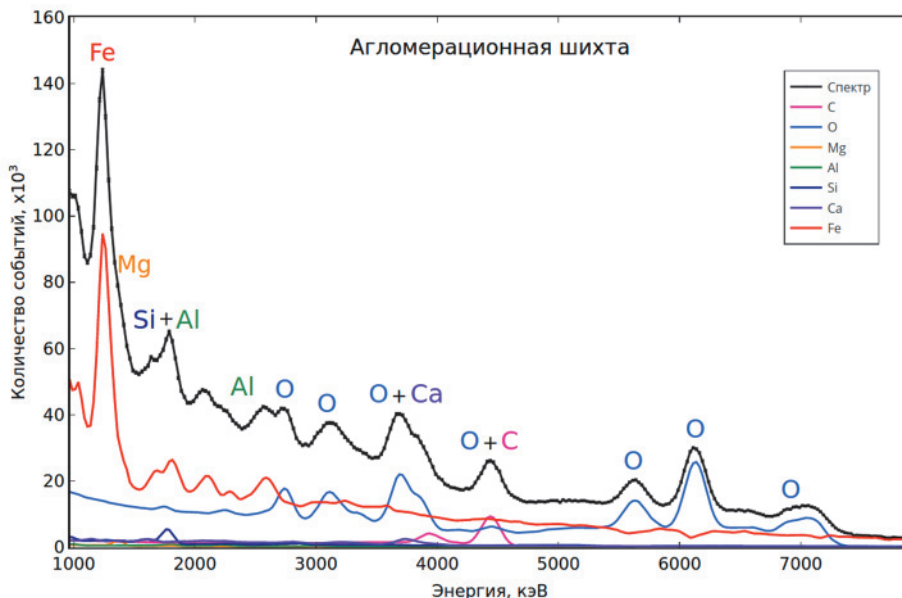


Рис. 2. Энергетический спектр гамма-квантов образца агломерационной шихты.

Точками с ошибками показаны экспериментальные данные. Показаны вклады от энергетических спектров отдельных элементов, а также суммарный вклад от всех элементов

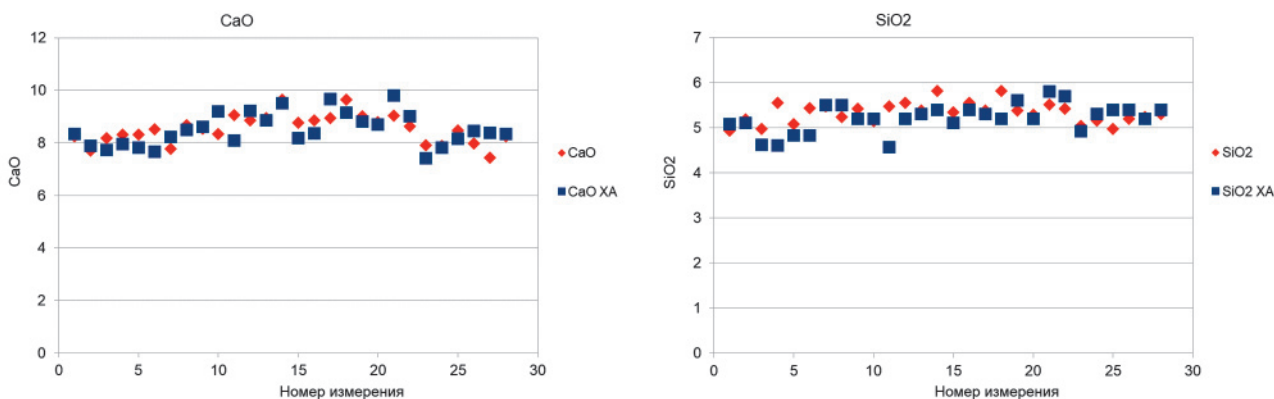


Рис. 3. Сравнение результатов химического анализа накопительной 2-х часовой пробы агломерата (квадраты) и усреднённого за 2 часа результата анализа шихты методом меченых нейтронов (ромбы)

### Список литературы

1. I. Bolshakov, M. Kolesnik, M. Sorokin, V. Kremenets, E. Razinkov. / Application of tagged neutron method for element analysis of phosphorus ore, Int. Journal of Mineral Processing and Extractive Metallurgy, v. 5, 2020, p. 54–59.
2. Alexakhin V.Y. et al., Determination of the elemental composition of geological rocks and minerals by the method of tagged neutrons. 23-rd International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei: Fundamental Interactions & Neutrons, Nuclear Structure, Ultracold Neutrons, Related Topics (ISINN-23). Dubna, Russia, May 25–29, 2015.

## Математическая модель оценки вероятности обнаружения источников радиационного излучения при сверхнизких уровнях полезного сигнала

**Ю.А. Руденко**

ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова» – Москва, Россия

В докладе представлена разработанная автором математическая модель расчёта вероятности обнаружения радиоизотопных источников нейтронного и гамма-излучения. Основой полученной математической модели является ряд концептуальных принципов, которым должна отвечать модель обнаружения. Разработанная вероятностная модель учитывает различную статистическую природу регистраций фоновых событий и излучения источника, а также исключает ряд несоответствий, выявленных в результате анализа существующей стандартной модели обнаружения.

### Mathematical Model for Evaluation of Detection Probability for Radiation Sources in Case of Ultra-low Desired Signal Level

**Yu.A. Rudenko**

FSUE Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA) – Moscow, Russia

A designed mathematical model for detection probability calculation of neutron and gamma radiation sources is presented in the report. The basis of the derived mathematical model is a set of conceptual principles to be provided. The designed probability model takes into account different statistical nature of background and source radiation counts; also, the model excludes a row of nonconformance to requirements that were disclosed by standard detection model assay.

#### Введение

Задача определения присутствия техногенных источников радиационного (нейтронного или гамма-) излучения возникает при проведении радиационного мониторинга окружающей среды, поиске радиоизотопных источников, при контроле пассажирских, грузовых, транспортных потоков через контрольно-пропускные пункты, оборудованные системами радиационного контроля, а также при обнаружении хорошо экранированных источников радиационного излучения.

Анализ современной литературы [1–3], посвящённой задаче обнаружения техногенных источников нейтронного и гамма-излучения, показал, что в качестве рабочей модели обнаружения (далее по тексту стандартной) используется модель, основанная на нормальном распределении. Однако нормальное распределение, являющееся непрерывным, по своей природе не подходит для задачи обнаружения, которая имеет дискретный характер с положительной областью значений счёта частиц регистрируемого излучения. Данное несоответствие в ряде случаев вызывает обоснованные сомнения относительно возможности применения стандартной модели обнаружения, в особенности в условиях предельно низких значений счёта регистрируемых частиц излучения источника, подлежащего обнаружению.

Целью выполненной работы являлось получение математически обоснованной расчётной модели для установления вероятности обнаружения источников радиационного излучения в зависимости от условий регистрации, применимой при максимально широком диапазоне условий обнаружения, в частности, при сверхнизком числе регистрируемых частиц источника.

Доклад содержит концепцию построения модели обнаружения, а также описание разработанной и стандартной моделей обнаружения.

### Постановка задачи

Требуется определить вероятность обнаружения излучения радиационного источника в условиях действия фонового излучения с учётом расположения источника, конфигурации и характеристик материальных преград, а также модели и характеристик регистрирующей системы.

### Существующая стандартная модель обнаружения

Ниже в табл. 1 представлено краткое описание стандартной математической модели для расчёта вероятности обнаружения, используемой для радиационных мониторов, изложенное в книге «Шумаков А.В. Радиационные мониторы ...» [1], а также в [2]. Эта же модель предлагается в [3], где приводится частичное (неполное) описание данной модели.

Таблица 1

Краткое описание стандартной модели обнаружения [1–3]

№ п/п	Рассчитываемая величина	Формулы	Используемые обозначения
1	Уровень значимости	$\alpha = P_{\text{ЛО}}$	
2	Порог обнаружения	$L = N_{\phi} + q_{\alpha} \sqrt{N_{\phi}}$	$P_{\text{ЛО}}$ – вероятность ложного обнаружения;
3	Закон распределения	$f[N] = \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot N_{cp}}} \exp \left[ -\frac{(N - N_{cp})^2}{2 \cdot N_{cp}} \right]$	$N_{\phi}, N_{cp}$ – средний уровень счёта от фона и от источника и фона, соответственно, за временное окно $\Delta t$ ;
4	Вероятность обнаружения	$P_{\text{обн}}[L, N_{cp}] = \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot N_{cp}}} \int_L^{\infty} e^{-\frac{(N - N_{cp})^2}{2 \cdot N_{cp}}} dN =$ $= \frac{1}{2} \left( 1 - \operatorname{erf} \left[ \frac{L - N_{cp}}{\sqrt{2 \cdot N_{cp}}} \right] \right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ \frac{L - N_{cp}}{\sqrt{2 \cdot N_{cp}}} \right]$	$q_{\alpha}$ – квантиль уровня значимости $\alpha$ стандартного нормального распределения; $\operatorname{erf}[x], \operatorname{erfc}[x]$ – интегралы вероятностей [4]

### Концепция модели обнаружения

В данном разделе приводятся концептуальные понятия и положения, на основе которых разработана предложенная автором модель обнаружения.

а) Основопологающим понятием является определение события «обнаружение»:

Событие «обнаружение» – регистрация за установленный временной интервал  $\Delta t$  (временное окно) числа частиц, превышающее заранее установленный пороговый уровень  $L$ . Пороговый уровень  $L$  определяется допустимым значением вероятности ложного обнаружения  $P_{\text{ЛО}} = P_{\text{ЛО}}[N_{\phi}, L, \Delta t]$  за счет регистрации только фонового излучения  $N_{\phi}$ . Допустимая вероятность ложного обнаружения задаётся регламентом функционирования системы обнаружения (например,  $P_{\text{ЛО}} = 10^{-4}$ ), либо рассчитывается исходя из заданной максимально приемлемой средней частоты ложных обнаружений.

б) Выбор порога обнаружения должен обеспечивать оптимальный компромисс между возможностью ложного обнаружения (ошибкой I рода по классической терминологии [5]) и возможностью необнаружения присутствующего источника (ошибкой II рода [5]).

в) Модель источника определяется энергетическим спектром испускаемых нейтронов или гамма-квантов, угловым распределением испускаемых частиц, активностью радиоизотопного источника, а также выходом излучения.

г) Эффективность регистрации излучения источника  $\varepsilon$  ( $\varepsilon = N_{\text{зарег}} / N_{\text{испущ}}$ ) представляет собой вероятность регистрации каждой испущенной источником частицы регистрируемого излучения. Учитывая взаимную независимость возможности оказаться зарегистрированной для каждой из испущенных источником частицы регистрируемого излучения, процесс регистрации можно представить как проводимый с каждым из  $N$  испущенных за временное окно  $\Delta t$  частиц розыгрыш, исходом которого является либо регистрация данной частицы с вероятностью  $p = \varepsilon$ , либо её нерегистрация с вероятностью  $q = (1 - \varepsilon)$ .

Описанная последовательность испытаний (розыгрышей) представляет собой схему Бернулли [5], а соответствующая вероятность регистрации  $n$  нейтронов из  $N$  испущенных определяется биномиальным законом распределения [5].

д) Взаимосвязь вероятностной модели обнаружения с дальностью обнаружения, а также с конфигурацией и характеристиками материальных преград, характеристиками регистрирующей системы, в том числе учёт влияния энергетического спектра источника – реализуется через соответствующую зависимость эффективности регистрации излучения источника, которая может рассчитываться методами численного моделирования переноса излучения, оцениваться по упрощённым формулам либо определяться экспериментально.

е) В качестве модели фонового излучения принимается модель простейшего потока случайных событий, определяемая распределением Пуассона [5].

ж) Распределение числа зарегистрированных частиц определяется распределением суммы двух случайных величин: числа регистраций за счёт фонового излучения и числа регистраций частиц источника, что математически определяется преобразованием свёртки распределений суммируемых случайных величин.

### Математическая модель обнаружения нейтронного импульса

Взаимосвязь вероятности и средней частоты  $n_{\Delta T}^{ЛО}$  ложных обнаружений:

$$P_{ЛО} = n_{\Delta T}^{ЛО} \cdot \Delta t / (\Delta T \cdot 60^2), \quad (1)$$

где  $\Delta T$  – период наблюдения, час;  $n_{\Delta T}^{ЛО}$  – среднее допустимое число ложных обнаружений за заданный период наблюдения  $\Delta T$ ;  $\Delta t$ , с – ширина временного окна.

Закон распределения числа фоновых регистраций и связанная с ним зависимость вероятности ложного обнаружения  $P_{ЛО}$  от порога обнаружения  $L$ :

$$p_{\Pi}[n, \Delta t, \lambda] = ((\lambda \cdot \Delta t)^n / n!) \cdot e^{-\lambda \cdot \Delta t}, \quad (2)$$

$$P_{ЛО} = P[N_{\Delta t} > L] = \sum_{k=L+1}^{\infty} \frac{(\lambda \cdot \Delta t)^k}{k!} e^{-\lambda \cdot \Delta t} = 1 - \frac{\Gamma[L+1, \lambda \cdot \Delta t]}{\Gamma[L+1]}, \quad (3)$$

где  $p_{\Pi}[n, \Delta t, \lambda]$  – вероятность регистрации  $n$  частиц регистрируемого излучения для закона Пуассона [5];  $\lambda = \dot{N}_{\phi}$ , нейтрон/с – средняя скорость регистрации фонового излучения детектором;  $\Gamma[L+1, \lambda \cdot t]$  – неполная гамма-функция [4];  $\Gamma[L+1, \lambda \cdot t] = L!$  – гамма-функция. Порог обнаружения рассчитывается путём численного решения уравнения (3) относительно  $L$  при заданной (целевой) вероятности ложного обнаружения  $P_{ЛО}$ , полученной по формуле (1) с последующим округлением полученного результата вверх до целого значения.

Число регистраций частиц излучения источника определяется биномиальным законом:

$$P_{N,n}[\varepsilon] = \frac{N!}{(N-n)! \cdot n!} \cdot \varepsilon^n \cdot (1-\varepsilon)^{N-n}, \quad (4)$$

где  $N$  – интегральный выход частиц излучения источника за временное окно  $\Delta t$ ;  $n$  – число зарегистрированных частиц;  $\varepsilon = n/N$  – эффективность регистрации частиц излучения источника, равная вероятности любой испущенной источником частице оказаться зарегистрированной.

Вероятность  $P_{ОБН}$  – обнаружения превышения порогового уровня  $L$  в условиях присутствия фоновых регистраций рассчитывается по формуле (5), полученной преобразованием свёртки законов (2) и (4) с последующим суммированием в соответствующих пределах по  $k$ :  $k = n = L+1, L+2, \dots, \infty$ :

$$P_{\text{ОБН}} = P[n_{\Sigma\text{сл}} > L] = 1 - \sum_{k=0}^L p_{\Sigma}[k] = 1 - \sum_{m=0}^L \frac{N! \cdot (1-\varepsilon)^N}{(N-m)! \cdot m!} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon}\right)^m \cdot \frac{\Gamma[L-m+1, \nu]}{\Gamma[L-m+1]}, \quad (5)$$

где  $\Gamma[L-m+1, \nu]$  – неполная гамма-функция [4];  $\Gamma[L-m+1] = (L-m)!$ .

Вероятность обнаружения источника вычисляется по формуле (6):

$$P_{\text{ОБН}}^{\text{ИСТ}} = \frac{P_{\text{ОБН}} - P_{\text{ЛО}}}{1 - P_{\text{ЛО}}}, \quad (6)$$

где  $P_{\text{ЛО}}$  – реальная вероятность ЛО, полученная по формуле (3) для рассчитанного  $L$ .

### Выводы

В результате выполненного исследования разработана математическая модель, позволяющая решать задачу получения вероятности обнаружения в зависимости от условий регистрации для максимально широкого диапазона условий. Разработанная модель является реализацией концепции построения модели обнаружения и обеспечивает реализацию всех предъявляемых к модели обнаружения требований и критериев её корректности, что позволяет её использовать для максимально широкого диапазона условий регистрации излучения, в том числе включая случай сверхнизкого количества регистрируемых частиц излучения источника. Особенностью разработанной модели является её дискретный характер, который связан с дискретностью числа регистрируемых частиц и дискретностью излучения реальных источников.

Анализ стандартной математической модели обнаружения [1–3], используемой для описания функционирования радиационных мониторов, показывает, что в целом данная модель обнаружения построена вполне адекватно, но основным (критическим) её недостатком является необоснованное искусственное использование нормального распределения, которое по своей природе в принципе не подходит для решения задачи обнаружения. Именно поэтому ряд требований и критериев корректности стандартной моделью не выполняется. Сравнение стандартной модели с моделью, предложенной автором, показывает, что стандартная модель может приводить к существенному отклонению вероятности обнаружения, достигающему по абсолютной величине 0,25 при эффективности регистрации  $\varepsilon \leq 0,5$ .

В представленной работе также разрешен и устранён другой существенный недостаток – отсутствие в существующей модели различий между событиями «обнаружение превышения порогового уровня» и «обнаружение излучения техногенного источника», являющимися разными событиями, вероятности которых рассчитываются по полученным автором соответствующим формулам (5), (6) и в общем случае не могут отождествляться.

### Список литературы

1. Шумаков А.В. Радиационные мониторы ядерных и радиоактивных материалов. Основы и особенности. – М.: Буки Веди, 2015.
2. Дуглас Райли, Норберт Энслин, Хэйстингс Смит, мл., Сара Крайнер. Пассивный неразрушающий анализ ядерных материалов: Пер. с англ. ФГУП «ВНИИА» – М.: ЗАО «Издательство Бином», 2000.
3. Gregory G. Thoreson, Erich A. Schneider. Efficient calculation of detection probabilities. – Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. – 2010. – 615 (2010), P. 313–325.
4. Манжиров А.В., Полянин А.Д. Справочник по интегральным уравнениям: Методы решения. – М.: Изд-во «Факториал Пресс», 2000.
5. Кремер Н.Ш. Теория вероятности и математическая статистика: Учебник для студентов вузов – 3-е изд. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2007.



## **Анализ численных методов восстановления спектров нейтронов при использовании различных регистрирующих систем: алмазного детектора, пластикового сцинтиллятора и набора активационных детекторов**

к.ф.-м.н. **Е.В. Рябева**, А.П. Денисенко, Р.Ф. Ибрагимов, И.В. Урупа

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ – Москва, Россия

В работе рассматриваются методы получения спектров быстрых нейтронов с использованием детекторов на основе алмазного чувствительного элемента, органического (пластмассового) сцинтиллятора с возможностью нейтрон-гамма разделения и набора активационных детекторов. Для восстановления спектров нейтронов применяются следующие методы: метод наименьших квадратов, метод регуляризации Тихонова, нейронные сети, метод максимальной энтропии, реализованный в коде MAXED, и итерационный алгоритм GRAVEL. Для получения матриц отклика детекторов используются методы математического моделирования и аналитические расчеты с последующей верификацией на экспериментальных данных. Проведен сравнительный анализ используемых методов восстановления.

## **Analysis of Neutron Spectrum Unfolding Methods Using Various Detection Systems: Diamond Detector, Plastic Scintillator and Set of Activation Detectors**

PhD **E.V. Ryabeva**, A.P. Denisenko, R.F. Ibragimov, I.V. Urupa

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute) – Moscow, Russia

The study are focused on methods of determining fast neutron spectra using detectors based on a diamond sensitive element, an organic (plastic) scintillator with the possibility of neutron-gamma separation, and a set of activation detectors. The following methods are used to unfold neutron spectra: least squares method, Tikhonov regularization, neural networks, maximum entropy method implemented in the MAXED code and iterative algorithm GRAVEL. To obtain the response matrices of these detectors, mathematical modeling and analytical calculations are used, followed by verification on experimental data. A comparative analysis of the unfolding methods was carried out.

### **Введение**

Спектры нейтронов несут информацию об источнике нейтронов и веществе, в котором происходит взаимодействие, поэтому разработка принципов нейтронной спектрометрии необходима для многих прикладных задач, например, в дозиметрии, исследовании радиационных повреждений, исследовании и модификации структуры вещества.

Неотъемлемой частью спектрометрии нейтронов является построение алгоритма преобразования аппаратных спектров в энергетические спектры нейтронов. В работе показаны результаты применения алгоритмов восстановления спектров нейтронов по экспериментальным данным: метод наименьших квадратов с наложенными условиями на решения, нейронные сети, алгоритмы MAXED и GRAVEL. Предложены критерии качества восстановления спектра для использованных алгоритмов.

## 1. Описание спектрометрических стендов

### 1.1. Спектрометр с алмазным чувствительным элементом (АЧУ)

Принцип регистрации нейтронов алмазным детектором АДДИ ДБ-10 основан на сборе заряда, возникающего при торможении в веществе детектора заряженных частиц, рожденных при взаимодействии нейтрона с ядрами углерода [1].

### 1.2. Спектрометр с пластмассовым сцинтиллятором

Спектрометр на основе пластмассового сцинтиллятора включает в себя цилиндрический сцинтиллятор EJ-276 размерами  $\varnothing 40 \times 40$  мм, вакуумный ФЭУ Hamamatsu R6231 и предусилитель (ПУ). Для реализации разделения нейтрон/гамма используется аппаратура цифровой обработки импульсов CAEN DT5730B [2].

### 1.3. Спектрометр на основе набора активационных детекторов

Метод спектрометрии нейтронов на основе активационных детекторов можно применять для спектрометрии быстрых нейтронов [3]. Набор активационных детекторов, используемый в данной работе, включал пластины из ванадия, алюминия, индия и меди.

## 2. Описание методов восстановления нейтронных спектров

### 2.1. Метод наименьших квадратов (МНК)

Метод наименьших квадратов является самым распространенным базовым методом восстановления информации о спектрах частиц при известном аппаратном спектре [4].

Пусть известен  $S_{ji}$  – отклик  $j$ -го канала спектрометра на нейтроны  $i$ -ой энергетической группы. В результате эксперимента исследователь получает аппаратный спектр  $N_j$  – отклик  $j$ -го канала детектора на искомый спектр. Искомый (истинный) спектр нейтронов обозначим  $F_i$  – число нейтронов в  $i$ -ой энергетической группе. Задача нахождения спектра нейтронов  $\vec{F}$  сводится к решению системы линейных уравнений:

$$\vec{N} = \mathbf{S} \times \vec{F}. \quad (1)$$

В МНК приближенным решением уравнения (1) является такой  $\vec{F}$ , который приведет к минимуму функционал:

$$\| \mathbf{S} \times \vec{F} - \vec{N} \| \rightarrow \min. \quad (2)$$

Так как искомое решение не может иметь отрицательных значений, то проведена модернизация метода МНК для нахождения условных (положительных) решений. Этот метод реализован практически во всех программных пакетах по обработке данных: MathCad, MathLab, Python, ORIGIN и др.

### 2.2. Метод нейронных сетей

Искусственная нейронная сеть (ИНС) представляет собой математическую модель, состоящую из отдельных нейронов, связь между которыми определяется весом и функцией активации [5].

### 2.3. Алгоритм MAXED и метод регуляризации Тихонова

Целью метода максимальной энтропии (ММЭ) является выбор спектра, который удовлетворяет уравнению (1) и одновременно максимизирует относительную энтропию  $S$  [7]:

$$S = - \int F(E) \ln \frac{F(E)}{F_0(E)} dE, \quad (3)$$

где  $F_0(E)$  – априорная вероятность (априорный спектр);  $F(E)$  – распределение вероятности после обработки (восстановленный спектр).

Метод ММЭ реализован с помощью программного кода MAXED [7].

В методе регуляризации Тихонова для близости  $F_0$  и  $F(E)$  используется квадратичная норма.

### 2.4. Алгоритм GRAVEL

Для восстановления спектров был выбран также итерационный алгоритм GRAVEL [6]:

$$F_j^{K+1} = F_j^K \exp \left( \frac{\sum_i W_{ij}^K \ln \left( \frac{N_i}{\sum_{j'} S_{ij'} \Phi F_{j'}^K} \right)}{\sum_i W_{ij}^K} \right), \quad (4)$$

где  $W_{ij}$  – весовая функция, которая имеет вид:

$$W_{ij}^K = \frac{F_j^K}{\sum_{j'} S_{ij'} F_{j'}^K} \cdot \frac{N_i^2}{\sigma_i^2}, \quad (5)$$

где  $\sigma_i = \sqrt{N_i}$ ;  $i = 1 \dots n$ ;  $j = 1 \dots m$ ;  $F_j^K$  – флюенс нейтронов в  $j$ -ом энергетическом интервале после  $K$ -ой итерации.

### 3. Восстановление спектров быстрых нейтронов по измеренным аппаратурным спектрам

Описанные спектрометрические стенды были использованы для получения аппаратурных спектров нейтронного генератора ИНГ-07Т.

На рис. 1 приведены спектры, восстановленные по показаниям сцинтилляционного спектрометра с помощью МНК и MAXED. На рис. 2 – спектры, восстановленные по показаниям набора активационных детекторов с помощью МНК, MAXED и искусственной нейронной сети.

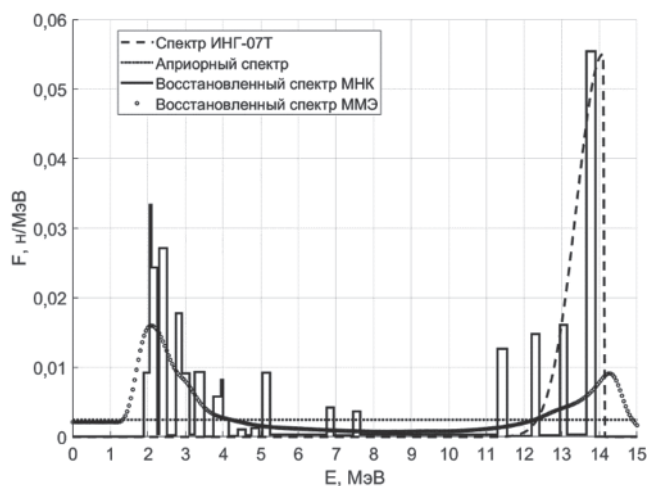


Рис. 1. Восстановленные спектры ИНГ-07Т по показаниям сцинтилляционного детектора

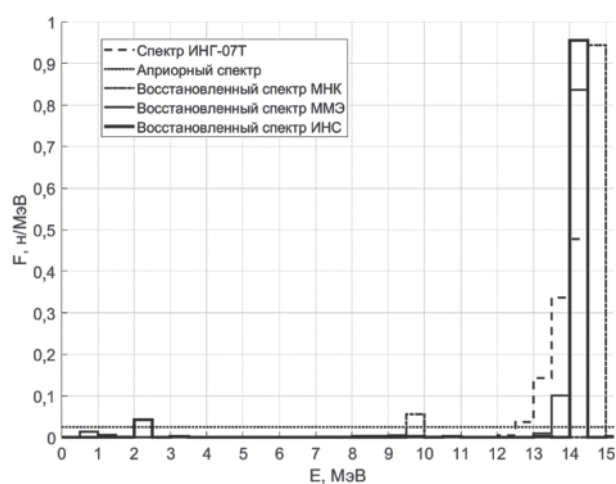


Рис. 2. Восстановленные спектры ИНГ-07Т по показаниям активационных детекторов

### 4. Критерии оценки качества восстановленных спектров

Одним из самых распространённых критериев для оценки качества восстановления и одновременно критерием остановки итерационных процессов является критерий  $\chi^2$ . Величина  $H_0$  подчиняется распределению  $\chi_{n-1}^2$ :

$$H_0 = \sum_i \frac{(S_{ji} \cdot F_i - N_j)^2}{\sigma_j^2} \sim \chi_{n-1}^2. \quad (6)$$

Ниже представлены три параметра, которые могут быть использованы для оценки близости восстановленного и тестового спектров.

Норма отклонения между тестовым  $\vec{F}_{test}$  и восстановленным  $\vec{F}$  спектрами:

$$H_1 = \|\vec{F} - \vec{F}_{test}\| = \sum_{i=1}^n (F_i - F_{test\ i})^2 \rightarrow \min. \quad (7)$$

Отношение флюенсов нейтронов, т.е. площадей под графиками восстановленного и тестового спектров:

$$H_2 = \frac{\sum \Delta E_i F_i}{\sum \Delta E_i F_{test\ i}} \rightarrow 1. \quad (8)$$

Разница в положениях пиков исследуемых спектров:

$$H_3 = \frac{E_{max} - E_{max\ test}}{E_{max\ test}} \rightarrow \min. \quad (9)$$

Критериями также могут служить оценки временных затрат на восстановление, устойчивость (т.е. зависимость от погрешности входных данных), устойчивость к изменению числа каналов и энергетических групп и т.д.

### 5. Сравнение и анализ использованных методов восстановления

В табл. 1 и 2 приведены значения описанных выше критериев для восстановленных спектров по показаниям сцинтилляционного детектора и набора активационных детекторов.

Таблица 1

Критерии восстановления по показаниям сцинтилляционного детектора

	МНК	MAXED
$H_0$	$4,2 \cdot 10^{-2}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$
$H_1$	$4,0 \cdot 10^{-1}$	$5,6 \cdot 10^{-4}$
$H_2$	$3,0 \cdot 10^{-2}$	$9,1 \cdot 10^{-2}$
$H_3$	$2,2 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$

Таблица 2

Критерии восстановления по показаниям активационных детекторов

	МНК	ИНС	MAXED
$H_0$	$1,5 \cdot 10^1$	$1,1 \cdot 10^{-1}$	$2,6 \cdot 10^1$
$H_1$	$1,3 \cdot 10^0$	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-1}$
$H_2$	$8,3 \cdot 10^{-1}$	1,0	$1,6 \cdot 10^0$
$H_3$	0,5	0	0

### Заключение

В данной работе рассмотрены методы восстановления энергетических спектров быстрых нейтронов по показаниям. Для измерения спектра нейтронного ИНГ-0Т использовались экспериментальные спектрометрические сборки на основе алмазного чувствительного элемента, пластикового сцинтиллятора и набора активационных детекторов. Анализ предложен-

ных методов восстановления показал, что экспериментальные спектры нейтронов в области 14 МэВ успешно восстанавливаются в соответствии с общепринятым критерием  $\chi^2$ . Однако дополнительные критерии восстановления не позволили однозначно определить преимущественный метода восстановления спектра. При выборе метода надо опираться на его возможности и целевые задачи: восстановление флюенса, восстановление положения пика или общая близость тестовых и восстановленных спектров. Для повышения качества восстановления необходима, кроме совершенствования экспериментальной базы, оптимизация методов восстановления.

### Список литературы

1. Gladchenkov E. V. et al. Experimental investigations and mathematical simulation of the operation of ionizing-radiation diamond detectors // *Instruments and Experimental Techniques*. – 2017. – Т. 60. – №. 3. – С. 339–344.
2. Ryabeva E. V. et al. Calibration of EJ-276 plastic scintillator for neutron–gamma pulse shape discrimination experiments // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 2021. – Т. 1010. – С. 165495.
3. Ibragimov R. F. et al. Experimental determination of the induced activity in activation detectors of a complex geometric shape // *Nuclear Energy and Technology*. – 2020. – Т. 6. – С. 156–167.
4. Matzke M. Unfolding procedures // *Radiation protection dosimetry*. – 2003. – Т. 107. – №. 1-3. – С. 149–168.
5. S. A. Hossein. Neutron spectrum unfolding using artificial neural network and modified least square method // *Radiation Physics and Chemistry*. – 2016. – Т. 126. – С. 75–84.
6. Chen Y.H. et al. Unfolding the fast neutron spectra of a BC501A liquid scintillation detector using GRAVEL method // *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*. – 2014. – Т. 57. – №. 10. – С. 1885–1890.
7. M. Reginatto, P. Goldhagen. MAXED, a computer code for the deconvolution of multisphere neutron spectrometer data using the maximum entropy method. – Dept. of Energy, 1998. – EML-595.



## Восстановление энергетических распределений источников нейтронов по показаниям сцинтилляционного спектрометра на основе монокристалла стильбена

**Д.И. Савин**, И.В. Урупа, Е.Э. Лупарь, Р.Ф. Ибрагимов, к.ф.-м.н. Е.В. Рябева

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ – Москва, Россия

Работа посвящена отработке спектрометра нейтронного и гамма-излучений на основе монокристалла стильбена с возможностью нейтрон-гамма разделения по форме импульса. Проведены измерения спектров откликов D-T и D-D генераторов нейтронов. С помощью математического моделирования в среде Geant4 рассчитаны матрицы откликов на нейтронное и гамма-излучения детектора заданной конфигурации. По результатам измерений проведено восстановление спектров нейтронного и сопутствующего гамма-излучений вышеуказанных источников нейтронов. Полученная неопределенность восстановления спектров нейтронов по показаниям детектора на основе стильбена составляет  $1,9 \pm 0,3\%$  для D-T линии (14,8 МэВ) и  $7,2 \pm 0,7\%$  для D-D линии (2,5 МэВ).

## Neutron Sources Energy Distributions Unfolding According to the Stilbene-based Scintillation Spectrometer Response Spectra

**D.I. Savin**, I.V. Urupa, E.E. Lupa, R.F. Ibragimov, PhD E.V. Ryabeva

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute) – Moscow, Russia

The work is devoted to the stilbene-based neutron and gamma radiation spectrometer with pulse shape discrimination capability development. Response spectra of D-T and D-D neutron generators were measured. Response matrices according to neutron and gamma radiation in detector were calculated in the Geant4. Based on the measurement results, neutron and gamma energy spectra of neutron sources were unfolded with an energy resolution of the spectrometer. The obtained uncertainty of unfolding of neutron spectra based on detector readout was  $1.9 \pm 0.3\%$  for the D-T line and  $7.2 \pm 0.7\%$  for the D-D line.

Структурная схема спектрометра на основе монокристалла стильбена представлена на рис. 1. Детектор включает в себя цилиндрический монокристалл стильбена размерами  $\varnothing 40 \times 40$  мм, вакуумный ФЭУ Hamamatsu R6231 [1], делитель напряжения для ФЭУ и предусилитель (ПУ). Благодаря различной форме световой вспышки от нейтронов и гамма-квантов в стильбене появляется возможность использовать метод разделения нейтронного и гамма-излучений по форме импульса (Pulse Shape Discrimination, PSD). Для реализации разделения используется аппаратура цифровой обработки импульсов CAEN DT5730B [2].

В работе использовались генераторы ИНГ-07Т (D-T нейтроны) и ИНГ-07Д (D-D нейтроны) [3]. Расстояние между мишенью генераторов и детектором составляло 40 см. Измерения проводились при различных углах  $\theta$  между осью генератора и направлением мишень-детектор. Плотность потока нейтронов в детекторе составляла  $\sim 10^5$  нейтрон $\cdot$ с $^{-1}$  $\cdot$ см $^{-2}$ . Полученные аппаратурные спектры генераторов D-D и D-T нейтронов представлены на рис. 2.

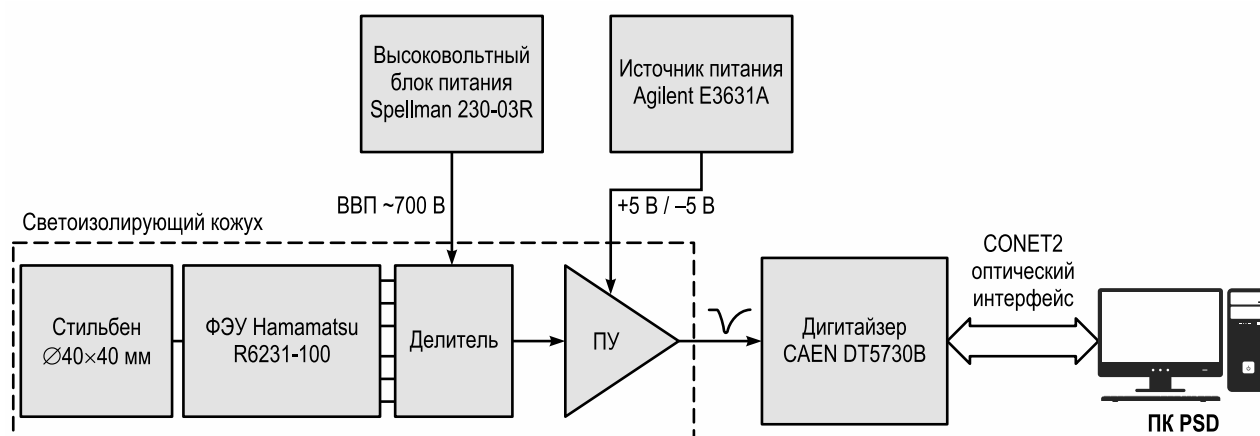


Рис. 1. Схема спектрометра на основе монокристалла стильбена

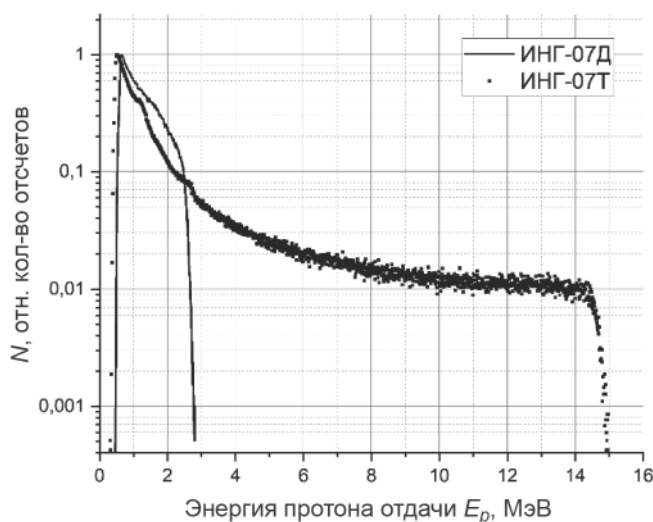


Рис. 2. Калиброванные аппаратурные спектры D-T и D-D нейтронов

Задача восстановления нейтронного спектра из аппаратурного сводится к решению интегрального уравнения Фредгольма:

$$\frac{dN}{dH} = \int R(H, E) \cdot \Phi(E) dE, \quad (1)$$

где  $R(H, E)$  – отклик детектора,  $dN/dH$  – дифференциальный амплитудный спектр,  $\Phi(E)$  – энергетический спектр нейтронов.

В случае измерения экспериментального спектра данное уравнение можно представить в матричном виде:  $\vec{N} = R\vec{\Phi}$ , где  $\vec{N}$  – вектор числа отсчетов в  $i$ -ом канале экспериментального спектра,  $\vec{\Phi}$  – вектор флюенсов нейтронов в  $j$ -ом энергетическом интервале,  $R$  – матрица откликов детектора.

Задача восстановления спектра заключается в поиске  $\vec{\Phi}$  из известных  $\vec{N}$  и построенной матрицы откликов  $R$ .

Матрица откликов монокристалла стильбена на нейтронное излучение в диапазоне 0,1–20,0 МэВ получена с помощью инструментария для моделирования прохождения элементарных частиц через вещество с использованием методов Монте-Карло Geant4.

Для восстановления спектров могут использоваться различные математические алгоритмы, в данной работе в качестве метода восстановления выбран метод GRAVEL [4]. Данный алгоритм восстановления является итеративным, представляет собой модификацию алгоритма SAND-II и имеет вид:

$$\Phi_j^{K+1} = \Phi_j^K \exp \left( \frac{\sum_i W_{ij}^K \ln \left( \frac{N_i}{\sum_{j'} R_{ij'} \Phi_{j'}^K} \right)}{\sum_i W_{ij}^K} \right), \quad (2)$$

где  $N_i$  – число отсчетов в  $i$ -ом канале экспериментального спектра,  $R_{ij}$  – элемент матрицы откликов, в которой в соответствие  $i$ -ому интервалу спектрометра (энергии протонов отдачи) ставится в соответствие  $j$ -ый энергетический интервал (энергии нейтронов),  $W_{ij}$  – весовая функция, которая имеет вид:

$$W_{ij}^K = \frac{R_{ij} \Phi_j^K}{\sum_{j'} R_{ij'} \Phi_{j'}^K} \cdot \frac{N_i^2}{\sigma_i^2}, \quad (3)$$

где  $\sigma_i = \sqrt{N_i}$ ,  $i=1 \dots n$ ,  $j=1 \dots m$ ;  $\Phi_j^K$  – флюенс нейтронов в  $j$ -ом энергетическом интервале после  $K$ -ой итерации. Начальное приближение спектра  $\Phi^0$  является константой.

Важную роль при восстановлении спектров данным методом является своевременная остановка итерационного процесса. При этом приведенный параметр  $\chi_{прив}^2$  имеет вид:

$$\chi_{прив}^2 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{(\sum_j R_{ij} \cdot \Phi_j - N_i)^2}{\sigma_i^2}, \quad (4)$$

где  $n$  – число энергетических бинов матрицы откликов.

Критерием остановки итерационного процесса в данной работе предложено изменение  $\delta$  приведенного  $\chi^2$  между двумя последующими итерациями, равное  $10^{-4}$ .

Результаты восстановления спектров нейтронов генераторов ИНГ-07Т и ИНГ-07Д представлены на рис. 3.

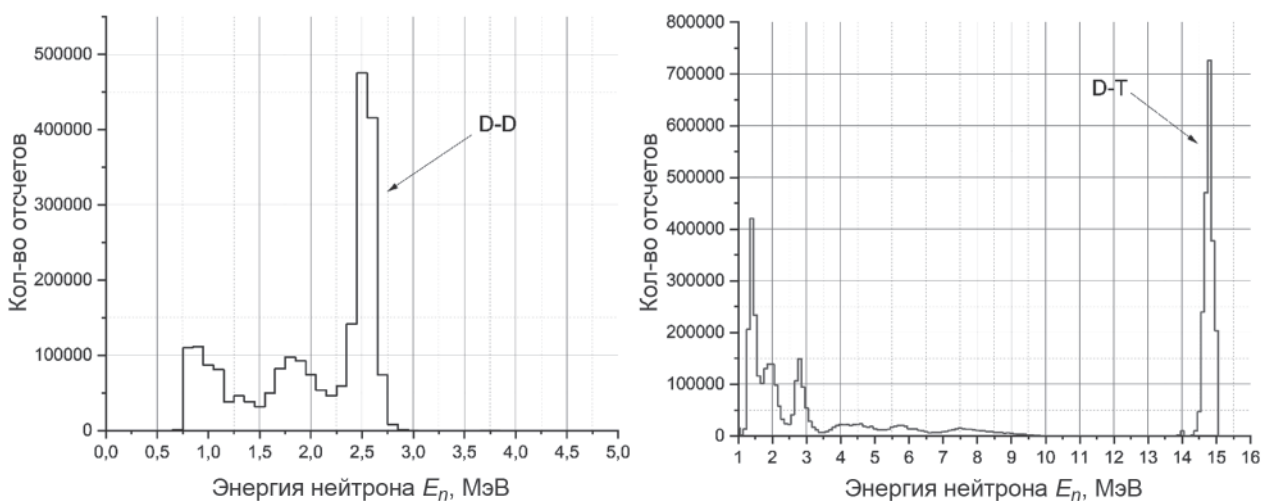


Рис. 3. Результаты восстановления спектра нейтронов генераторов ИНГ-07Д (слева) и ИНГ-07Т (справа) методом GRAVEL

Полученная неопределенность восстановления спектров нейтронов по показаниям детектора на основе стильбена составляет  $1,9 \pm 0,3\%$  для D-T линии (14,8 МэВ) и  $7,2 \pm 0,7\%$  для D-D линии (2,5 МэВ). Под неопределенностью восстановления понимается соотношение  $\Delta E/E$ , где  $\Delta E$  – ширина на полувысоте пика на восстановленном спектре, соответствующего D-D или D-T линии [МэВ],  $E$  – средняя энергия нейтронов в пике [МэВ].

Для сравнения, в работе [5] получены следующие значения неопределенности восстановления спектров нейтронов: 7,3% для энергии 2,45 МэВ и 3% для с энергии 14 МэВ.

В области малых энергий (1,0–3,0 МэВ для D-T нейтронов и 0,7–2,0 МэВ для D-D нейтронов), помимо рассеянного нейтронного излучения, наблюдаются пики, не ассоциированные с нейтронами. Возможной причиной наличия данных особенностей могла стать неточность калибровки спектрометра по протонам отдачи, т.к. для калибровки спектрометра имеется возможность использовать только две энергетические линии (2,5 МэВ и 14,1 МэВ).

Кроме того, возможной причиной наличия отличного от нуля числа нейтронов в области низких энергий могла послужить неполная физическая модель, использованная при получении матрицы откликов. На аппаратном спектре генератора D-T нейтронов ИНГ-07Т (рис. 2) в области малых энергий видны неоднородности, вызванные, вероятно, протеканием реакции  $(n, \alpha)$  на углероде, входящем в состав органического монокристалла стильбена.

Для внесения поправок в модель, используемую для получения матрицы откликов, необходимо учитывать различие в световых выходы от альфа-частиц и протонов отдачи (закон Биркса).

Также с помощью Geant4 получена матрица откликов монокристалла стильбена на гамма-излучение в диапазоне 0,1–10,0 МэВ.

С использованием матрицы откликов на гамма-излучение восстановлены спектры сопутствующего гамма-излучения, возникающего при работе генераторов ИНГ-07Д и ИНГ-07Т (рис. 4).

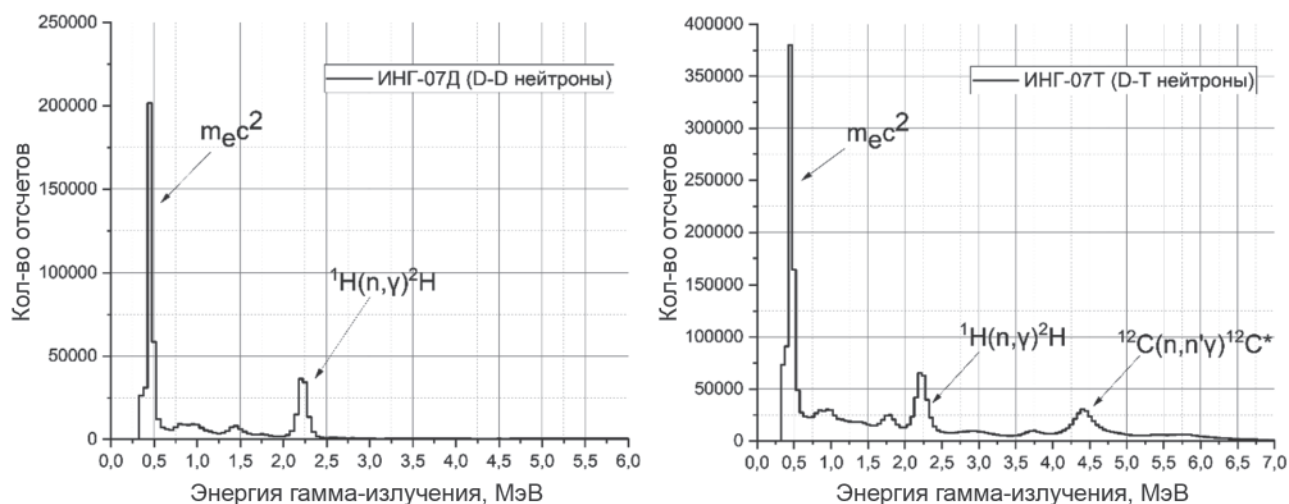


Рис. 4. Результаты восстановления спектра сопутствующего гамма-излучения генераторов ИНГ-07Д (слева) и ИНГ-07Т (справа) методом GRAVEL

На восстановленных спектрах сопутствующего гамма-излучения присутствуют пики, соответствующие энергии покоя электрона (0,511 МэВ), реакциям нейтронного захвата на водороде  ${}^1\text{H}(n, \gamma){}^2\text{H}$ , реакции неупругого рассеяния нейтрона на ядрах углерода  ${}^{12}\text{C}(n, n'\gamma){}^{12}\text{C}^*$ . Также можно выделить пик одиночного вылета для гамма-квантов реакции радиационного захвата. Восстановленные значения энергии приведены в табл. 1.

Таблица 1

## Восстановленные значения энергии гамма-излучения

Теоретическое значение энергии, МэВ	Восстановленное значение энергии (для ИНГ-07Д), МэВ	Восстановленное значение энергии (для ИНГ-07Т), МэВ
0,511	$0,46 \pm 0,06$	$0,46 \pm 0,06$
2,21	$2,22 \pm 0,12$	$2,22 \pm 0,17$
4,43	–	$4,43 \pm 0,25$

Как видно из табл. 1, восстановленные значения энергии покоя электрона и реакций  ${}^1\text{H}(n, \gamma){}^2\text{H}$  и  ${}^{12}\text{C}(n, n'\gamma){}^{12}\text{C}^*$  совпадают с теоретическими в пределах погрешности.

### Список литературы

1. Hamamatsu Photonics / Photomultiplier tube R6231. URL: <https://www.hamamatsu.com/jp/en/product/type/R6231/index.html>. Дата обращения: 12.01.2021.
2. CAEN Products / DT5730/DT5730S 8-channel 14 bit 500 MS/s Digitizer URL: <https://www.caen.it/products/dt5730/>. Дата обращения: 12.01.2021.
3. D. Chernikova et. al. Experimental and numerical investigations of radiation characteristics of Russian portable/compact pulsed neutron generators: ING-031, ING-07, ING-06 and ING-10-20-120. Nucl. Inst. Methods A, 746 (2014), pp. 74-86.
4. C. YongHao, C. XiMeng, L.JiaRong et al. Unfolding the fast neutron spectra of a BC501A liquid scintillation detector using GRAVEL method //Science China (Physics, Mechanics & Astronomy). 2014. Vol. 57 №10, pp. 1885-1890.
5. Pinzhenin E.I., Khilchenko A.D., Zubarev P.V. et al. Development of FPGA-Based Real-Time Neutron Spectrometer Using Stilbene Scintillator. Plasma and Fusion Research. 2019. Vol. 14, 2402025.



## **Исследовательская установка для диагностики физических процессов, протекающих при работе импульсного разрядника с оптическим управлением**

**М.С. Скоробогатых**, к.т.н. С.Г. Давыдов, к.т.н. В.О. Ревазов, В.П. Селезнёв,  
А.И. Ядровский, к.т.н. Р.Х. Якубов

ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова» – Москва, Россия

В работе представлены результаты создания нового инструмента, позволяющего проводить исследования физических процессов, протекающих при работе импульсного разрядника с оптическим управлением. Получены практические данные о предельных измеряемых параметрах установки и результаты корпускулярных исследований в остаточной среде разреженного газа.

## **Research Installation for Diagnostics of Physical Processes Occurring During the Operation of a Pulse Switch with Optical Control**

**M.S. Skorobogatykh**, PhD S.G. Davydov, PhD V.O. Revazov, V.P. Seleznev,  
A.I. Yadrovskiy, PhD R.H. Yakubov

FSUE Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA) – Moscow, Russia

The paper presents the results of the creation of a new tool that allows one to study the physical processes occurring during the operation of a pulsed switch with optical control. Practical data have been obtained on the limiting measured parameters of the installation and the results of corpuscular studies in the residual medium of a rarefied gas.

### **Введение**

Явление взаимодействия лазерного излучения с поверхностью металлов, приводящее к образованию лазерной плазмы, имеет как научный, так и прикладной интерес. Этот процесс лежит в основе, например, коммутаторов с оптическим управлением. Ключевым преимуществом данного вида коммутатора в мощных импульсных системах является гальваническая развязка цепей управления и коммутации и высокая стабильность работы, что повышает надежность всей системы в целом.

Для создания разрядника с оптическим управлением требуется проведение исследований в физике газового и вакуумного разряда, взаимодействия мощных импульсов лазерного излучения с веществом. Все это можно реализовать на разработанном авторами работы исследовательском комплексе, созданном во ФГУП «ВНИИА».

### **Исследовательская установка**

На рис. 1 изображена схема экспериментального стенда. Оптическая часть установки представлена импульсным Nd:Yag лазером с модуляцией добротности и оптической линией, которая необходима для регистрации фотодатчиком лазерного импульса, а также фокусировки его собирающей линзой на катод-мишень разрядника. Все элементы (лазер, линза, фотодатчик, светоотражательная пластина, светофильтры) расположены на трехпозиционных манипуляторах, с возможностью быстрой регулировки положения на оптической плите.

Системы откачки и газонапуска подключены к вакуумной камере, которая представляет собой «шестерник», нижний фланец которого жестко закреплен на оптической плите. Камера также оснащена вакуумным датчиком, высоковольтными выводами, оптически прозрачным

окном и специально разработанной оснасткой для проведения исследований в разрядниках с оптическим управлением.

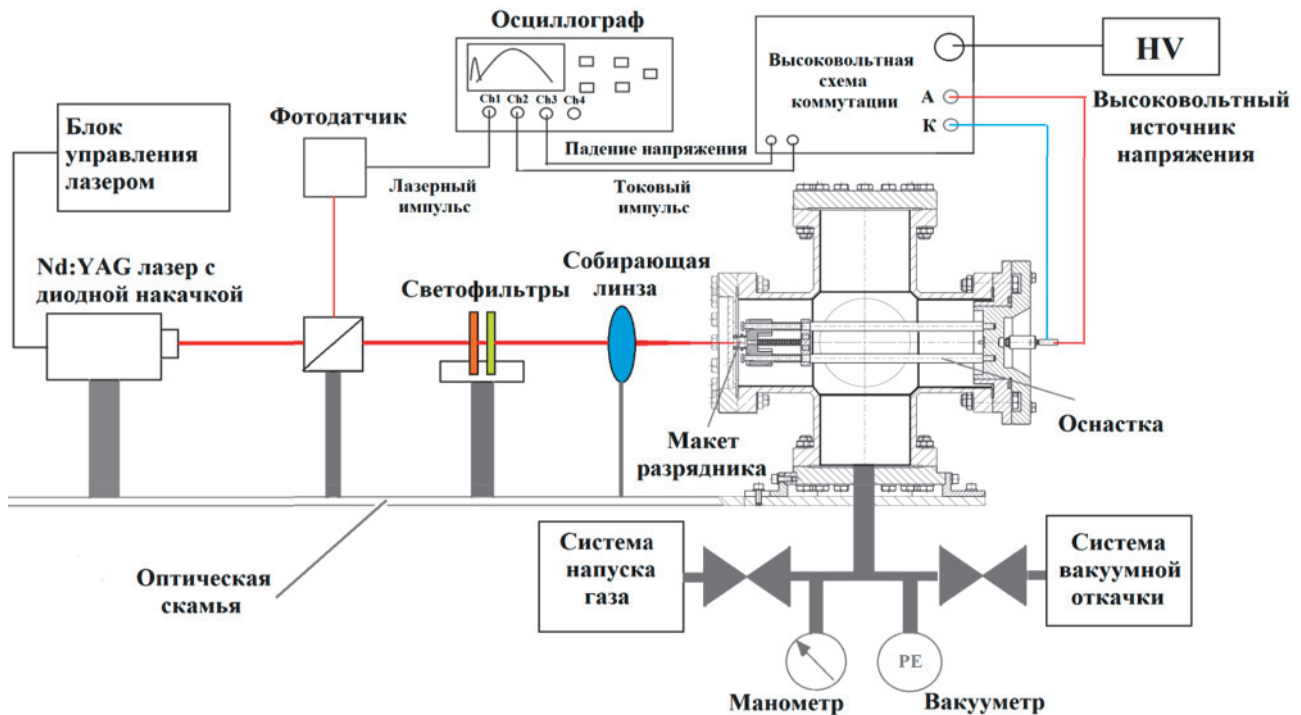


Рис. 1. Исследовательская установка

Используемый твердотельный лазер формирует импульс излучения с длиной волны 1064 нм при диаметре пучка 1,5 мм, энергией до 3,5 мДж, длительности по полувысоте 5,5 нс. Эти характеристики позволяют обеспечивать максимальную интенсивность на мишени  $3 \cdot 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>.

Конструкцией оптической линии предусмотрена установка различных светофильтров и линз. Первое необходимо для регулировки энергии лазерного излучения, например, уменьшение до 100 мкДж. Второе служит для фокусировки с возможностью удобного позиционирования пятна на электроде при различных испытаниях макетов разрядника.

Система вакуумной откачки способна создавать разрежение вплоть до  $10^{-6}$  Торр. Этого вакуума вполне достаточно для проведения исследований, т.к. остаточное давление большинства диффузионно-сваренных ЭВП находится на том же уровне и выше. Система напуска газа предназначена для создания газовой среды с давлением выбранного газа до 3 атм.

### Результаты экспериментов

С помощью приведенной выше установки были получены новые экспериментальные данные, которые позволили провести исследования механизмов, обеспечивающих работу разрядников с оптическим управлением

В работе [1] представлены результаты исследований вакуумного разрядника с электродной системой, выполненной из сплава титана. Получена зависимость времени задержки начала разряда в цепи от интенсивности лазерного излучения при остаточном давлении в вакуумной камере  $10^{-3} - 10^{-5}$  Торр. За начало отсчета задержки принимался уровень 0,5 временного профиля лазерного импульса, который снимался с фотодатчика. При интенсивностях более  $2 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> задержка не превышала 20 нс и наблюдалась стабильная работа прибора в выбранном диапазоне давлений с джиттером 1–2 нс. При интенсивности  $5 \cdot 10^7$  Вт/см<sup>2</sup> задержка составляла 50 нс, а джиттер возрастал до 10 нс. Таким образом, данные, полученные в эксперименте, опре-

деляют пороговую интенсивность, необходимую для стабильной работы прибора, минимального джиттера, при использовании электродной системы из сплава титана. Также видно, что задержка с учетом погрешностей не зависит от давления остаточной среды в диапазоне  $10^{-3}$ – $10^{-5}$  Торр. При исследовании работы прибора поджигом интенсивностью порядка  $3 \cdot 10^9$  Вт/см<sup>2</sup> наблюдается уменьшение задержки до 5 нс. При таких интенсивностях возможен эффект ионизации остаточных газов (с большой вероятностью – азота) квантами УФ-излучения лазерной плазмы, что приводит к более быстрому механизму возникновения разряда в цепи. В работе [1] также продемонстрирован широкий диапазон межэлектродных напряжений 0,25–5 кВ, при которых может работать вакуумный разрядник, интенсивность поджига при этом составляла  $7 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>.

В работе [2] приведены результаты корпускулярных исследований лазерной плазмы в вакууме с использованием одиночного электростатического зонда. На осциллограммах сигнала с зонда наблюдались три группы частиц. 1 группа возникала практически синхронно с импульсом лазерного излучения, 2 группа через  $\sim 150$  нс (пик сигнала с зонда), 3 группа – через  $\sim 500$  нс. Интенсивность излучения на поверхности мишени составляла  $\sim 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>,  $P \sim 10^{-4}$  Торр. Для 1 группы частиц на пике сигнала с зонда рассчитаны следующие параметры плазмы  $T_e \sim 6 \pm 2$  эВ,  $n_e \sim 6 \cdot 10^{16}$  м<sup>-3</sup>, для 2 группы  $T_e \sim 5 \pm 1$  эВ,  $n_e \sim 10^{17}$  м<sup>-3</sup>. Для 3 группы частиц, судя по ВАХ, происходят сильные колебания, собственное электрическое поле которых превосходит поле, создаваемое в плазме зондом. При уменьшении давления до  $10^{-5}$  Торр электронная температура 1 группы частиц возрастала до  $20 \pm 4$  эВ, а концентрация падала. При увеличении давления до  $10^{-3}$  Торр наблюдалась только 1 группа частиц, с электронной температурой  $6 \pm 2$  эВ. Все это свидетельствует о механизме образования проводящей среды, связанном с ионизацией остаточных газов.

В работе [3] представлены результаты исследований газоразрядного коммутатора с электродной системой, выполненной из сплава титана. Первоначально был проведен эксперимент по снятию кривой Пашена в среде азота для нашей конфигурации электродов. Эксперимент показал отклонение от теоретической кривой Пашена для плоскопараллельной электродной системы в диапазоне  $p \cdot d$  1–100 Торр·см, эти данные необходимы для точного сопоставления рабочего напряжения с напряжением самопробоя разрядника. Далее производилось исследование времени задержки начала разряда от давления в приборе при различных уровнях напряжения 0,4–0,9  $U_0$ , где  $U_0$  – напряжение самопробоя промежутка. Интенсивность излучения управления разрядником составляла  $6 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>. Удалось установить, что при давлении 0,2–0,7 бар прибор стабильно работает с максимальной задержкой 20 нс, причем практически отсутствует влияние уровня напряжения между электродами. При больших давлениях наблюдается стремительный рост времени задержки разряда. Для управляемого разрядника с рабочим напряжением на уровне 3 кВ требуется электропрочность как минимум в полтора раза больше, для стабильной работы и минимальной вероятности самопроизвольного срабатывания. Такое напряжение самопробоя достигается при давлении в приборе более 1 атм. В работе [3] показана зависимость времени задержки от давления при различных уровнях интенсивности  $I_{max} \sim 6 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>. Напряжение в межэлектродном промежутке фиксировалось и составляло 3 кВ. Результаты представлены на рис. 2.

Можно наблюдать значительное снижение времени задержки с увеличением интенсивности, а также удалось добиться стабильной работы прибора при давлении 1,4 бар ( $U_0 \sim 7$  кВ). Также в статье продемонстрирована возможность управления разрядником при волоконно-оптической транспортировке излучения. Диаметр сердцевины волокна составлял 200 мкм, при этом удалось добиться интенсивности на поверхности катода-мишени  $5 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>. Были изготовлены макеты приборов с электропрочностью (напряжением самопробоя) на уровне 4,5 кВ и 6,5 кВ, которые испытывались на ресурс работы при коммутации импульсов амплитудой 250 А и длительностью 3,5 мкс. Разрядники продемонстрировали возможность применения волоконной транспортировки в качестве линии передачи управляющего излучения, а также высокие ресурсные показатели для такого компактного устройства рис. 3.

В частности, для прибора с  $U_0 = 4,5$  кВ максимальный разброс задержки за 10000 срабатываний составил 25 нс.

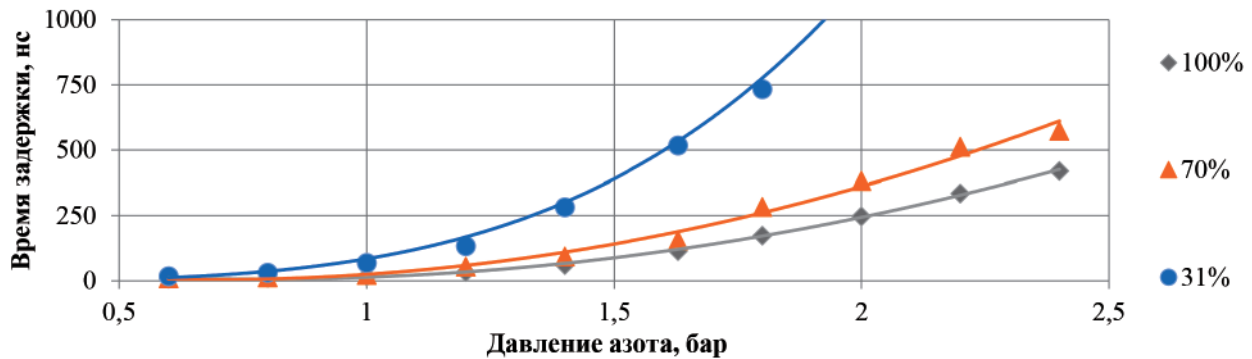


Рис. 2. Зависимость времени задержки от давления при интенсивностях лазерного излучения  $I_{max}, 0,7I_{max}, 0,3I_{max}$  [3]

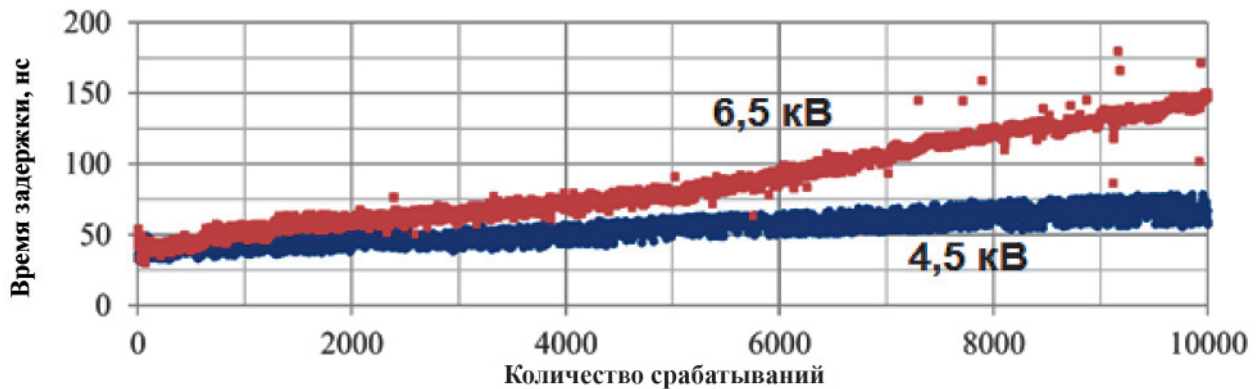


Рис. 3. Зависимость времени задержки от количества срабатываний для разрядников с разным напряжением самопробоя 6,5 кВ и 4,5 кВ [3]

### Заключение

В докладе описана установка для исследований вакуумных и газонаполненных коммутаторов с оптическим управлением. Приведены предельные параметры, которые создаются в рабочем объеме камеры для исследований разряда, как в вакууме, так и в газе. Продемонстрирована возможность управления разрядником излучением с транспортировкой по волоконно-оптической линии. Показаны результаты экспериментальных исследований в вакуумных и газонаполненных разрядниках. Получены зависимости временных характеристик разряда от давления остаточной среды и интенсивности инициирующей разряд в приборе. Сделаны выводы о наиболее вероятных механизмах формирования проводящей среды в зависимости от условий эксперимента.

### Список литературы

1. Каторов А.С., Ревазов В.О., Селезнев В.П., Ядровский А.И. Исследование процесса инициирования коммутации в вакуумном разряднике с оптическим управлением // Технологии ЭМС. – 2018. – № 4(67). – С. 3–10.
2. Давыдов С.Г., Долгов А.Н., Каторов А.С., Ревазов В.О., Р.Х. Якубов. Исследование лазерной плазмы в среде разреженного газа с использованием одиночного электростатического зонда // Журнал технической физики. – 2020. – № 6(90) – С. 919–924.
3. Каторов А.С., Ревазов В.О., Селезнев В.П., Ядровский А.И. Миниатюрный быстродействующий импульсный разрядник с оптическим управлением // Технологии ЭМС. – 2018. – № 3(66). – С. 35–42.

## Результаты разработки технического проекта системы радиационного контроля модернизированного плавучего энергоблока

д.т.н. С.Б. Чебышов, **С.В. Ткачев**

АО «СНИИП» – Москва, Россия

Система радиационного контроля (СРК) является одной из составных частей автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) модернизированного плавучего энергоблока (МПЭБ) проекта 20871. В докладе представлены результаты разработки технического проекта СРК МПЭБ. Представлены решения по структуре и составу СРК МПЭБ, объем радиационного контроля и контролируемые параметры. Приведены особенности СРК МПЭБ, разработанной в АО «СНИИП».

## Results of the Development of the Technical Design of the Radiation Monitoring System of the Modernized Floating Power Unit

Dr. S.B. Svebyshov, **S.V. Tkachev**

JSC "SNIIP" – Moscow, Russia

The radiation monitoring System (RMS) is one of the components of the automated process control system (APCS) of the modernized floating power unit (MFPU) of project 20871. The report presents the results of the development of the technical project of the RMS MFPU. Technical solutions for the structure and composition of the RMS MFPU, the amount of radiation monitoring and controlled parameters are presented. The features of the RMS MFPU developed in JSC "SNIIP" are given.

В настоящее время по мере истощения запасов ископаемого сырья в освоенных регионах активизируются разведка и освоение труднодоступных территорий. Для России это прежде всего регионы Крайнего Севера, Сибири, Дальнего Востока и Арктического бассейна. Там сконцентрированы основные национальные запасы углеводородов и других полезных ископаемых. Для устойчивого промышленного развития и решения социальных вопросов населения эти регионы должны быть обеспечены электрической и тепловой энергией, надежно функционирующим морским транспортом и ледокольным флотом.

Значительная удаленность осваиваемых регионов от промышленно развитых районов страны и неразвитость транспортной системы приводят к значительному усложнению доставки всего необходимого, в первую очередь, топлива, что обуславливает высокую себестоимость производства электроэнергии. При этом указанные пункты изолированы от единой энергосистемы России, что предъявляет повышенные требования по надежности энергоисточников, безопасности их использования.

Оптимальным решением поставленных задач является обеспечение энергоснабжения удаленных объектов при помощи плавучих энергоблоков (с ядерной энергетической установкой). В настоящее время разрабатывается проектная документация на модернизированный плавучий энергоблок (МПЭБ) проекта 20871, существенно отличающийся от эксплуатирующегося в г. Певек ПЭБ «Академик Ломоносов».



Одним из безусловных требований к использованию МПЭБ является высочайший уровень ядерной и радиационной безопасности, обеспечивающий границу зоны наблюдения в пределах границы МПЭБ и с учетом суровых природно-климатических условий.

Для реализации данного требования необходим постоянный контроль за состоянием радиационной обстановки на МПЭБ. Основной объем информации о состоянии радиационной обстановки на МПЭБ и о состоянии окружающей среды собирается, обрабатывается и выдается соответствующим службам системой радиационного контроля. Персонал этих служб на основе получаемой информации и своего опыта оценивает состояние радиационной обстановки на МПЭБ и состояния окружающей среды и принимает решения, которые должны обеспечить безопасную эксплуатацию МПЭБ и минимизировать его воздействие на окружающую среду. Качество принимаемых решений в значительной степени и определяет степень безопасности МПЭБ и уровень его воздействия на окружающую среду.

В этой связи актуальными являются вопросы, связанные с повышением степени соответствия информации, выдаваемой СРК, реальной обстановке на МПЭБ, которое может быть достигнуто путем реализации специальных алгоритмов обработки информации, улучшением надежностных характеристик СРК, оптимизации объема и формы предоставления информации человеку-оператору, расчета комплексных показателей качества радиационной обстановки, отслеживания тенденций в изменении состояния радиационной обстановки.

СРК МПЭБ обеспечивает решение следующих основных задач:

- непрерывный контроль состояния радиационной обстановки на МПЭБ для своевременного обнаружения отклонения работы реакторной установки (РУ) от условий нормальной эксплуатации в части радиационного контроля (РК);
- получение информации, подтверждающей, что МПЭБ находится в пределах безопасной эксплуатации, т. е. контролируемые радиационные параметры не превышают установленных нормативными документами пределов;
- передача информации об обнаруженных отклонениях в работе РУ объекта от условий нормальной эксплуатации в части РК в систему обмена данными АСУ ТП объекта и в систему управления РУ (СУ РУ);
- повышение эффективности и надёжности работы РУ МПЭБ за счёт раннего обнаружения дефектного технологического оборудования или нарушения его функционирования;
- сигнализация о выходе параметров РУ МПЭБ за пределы безопасной эксплуатации, оценка масштаба аварии, получение информации, необходимой для ведения работ по ликвидации последствий аварии и введения планов мероприятий по защите экипажа и населения.

В состав СРК МПЭБ входят общесистемный программно-технический комплекс верхнего уровня и следующие основные компоненты:

- подсистемы радиационного технологического контроля (РТК);
- подсистемы радиационного контроля помещений (РКП);
- подсистемы радиационного контроля за нераспространением радиоактивных загрязнений (РКЗ);
- подсистемы радиационного дозиметрического контроля (РДК).

РТК предназначен для диагностики состояния защитных барьеров и технологического оборудования систем с радиоактивными средами. РТК выполняется на основе измерений мощности дозы гамма- и нейтронного излучения от технологического оборудования, объемной активности нормируемых радионуклидов в газозвудушных средах. Указанные параметры характеризуют герметичность барьеров безопасности и технологического оборудования, эффективность работы фильтров.

РКП предназначен для контроля радиационной обстановки и сигнализации о ее выходе за установленные пределы. РКП направлен на предотвращение внешнего и внутреннего облучения персонала сверх установленных пределов доз профессионального облучения и ограничение облучения на возможно низком уровне.

Для помещений МПЭБ, где при проведении технологических операций возможно резкое изменение радиационной обстановки, вплоть до превышения установленных контрольных уровней индивидуальной дозы, предусматривается информирование членов экипажа применением приборов светозвуковой сигнализации и выводом показаний на центральный пульт радиационного контроля (ЦПРК).

РКЗ обеспечивает контроль загрязнения радиоактивными веществами кожных покровов, спецодежды, спецобуви и СИЗ членов экипажа в зоне контролируемого доступа (ЗКД), в санпропускниках и саншлюзах. Контроль выполняется в виде принудительного контроля радиоактивного загрязнения на 2-х барьерах:

- I барьер – контроль на выходе из ЗКД в «грязное» отделение санпропускника;
- II барьер – контроль на выходе из душевой в «чистое» отделение санпропускника.

РДК обеспечивает контроль, учет и планирование дозы внешнего и внутреннего облучения членов экипажа и прикомандированных лиц посредством индивидуального дозиметрического контроля, СИЧ.

Помимо непрерывного и периодического контроля параметров полей ионизирующих излучений, на МПЭБ производится контроль нерадиационных параметров, влияющих на состояние радиационной обстановки на МПЭБ.

Данные о состоянии нерадиационных параметров, влияющих на радиационную обстановку на МПЭБ, поступают в СРК двумя путями:

- часть нерадиационных параметров контролируется с использованием датчиков, входящих в состав СРК (расход воздуха, удаляемого системой вентиляции контролируемой зоны, температура воздуха в ветвях газоаэрозольного контроля (ГАК), расход воздуха в ветвях ГАК, состояние дверей и люков КЗ, режим работы побудителей расхода воздуха);
- часть параметров СРК получает из других систем, входящих в состав АСУ ТП МПЭБ, по каналам передачи данных (разрежение и температура в аппаратных и помещениях РУ, давление и уровень в цистернах ЖРО, состояние клапанов 1 контура и отсечных клапанов парогенераторов, работа вентиляторов КЗ, наличие расхода теплоносителя в СО и Р).

СРК разрабатывается как трехуровневая человеко–машинная система с распределенным сбором информации, централизованным контролем информации и управлением на уровне оператора, функционирующая на основе средств вычислительной техники.

ТС нижнего уровня (первый уровень) обеспечивают выполнение задач поканального измерения физических величин, управления исполнительными механизмами (крановые распределители, побудители расхода воздуха).

На нижнем уровне расположены:

- установки контроля загрязненности кожных поверхностей и одежды членов экипажа, поверхности;
- лабораторное оборудование, СИЧ;
- устройства детектирования параметров полей ионизирующего излучения;
- исполнительные механизмы, обеспечивающие работу ГАК;
- датчики контроля нерадиационных параметров.

На втором уровне осуществляется предварительная обработка, контроль и передача данных, поступающих от устройств нижнего уровня на верхний уровень системы. Формируются

управляющие воздействия для исполнительных механизмов, блоков сигнализации по командам с верхнего уровня системы, а также по информации, поступающей с устройств детектирования нижнего уровня.

К устройствам второго уровня относятся:

- централизованные устройства накопления и обработки информации (УНО), реализующие независимые каналы обработки информации с блоков детектирования со счетным выходом, обеспечивающие контроль расхода воздуха и температуры в ветвях ГАК, контроль нерадиационных параметров;
- блоки сигнализации;
- устройства, обеспечивающие обмер индивидуальных дозиметров;
- устройства контроля и распределения электропитания ~220 В 50 Гц;

Верхний уровень СРК обеспечивает прием от оборудования среднего уровня значений радиационных и нерадиационных параметров, данных о состоянии оборудования и статусных событиях в системе, передачу команд и данных на оборудование нижнего уровня, визуальное представление обобщенной поступающей информации и вывод отчетной информации на печать. На верхнем уровне расположены:

- центральный пульт радиационного контроля, выполненный на основе технических средств АО «Концерн «НПО «Аврора» и унифицированный с пультами АСУ ТП МПЭБ;
- резервный пульт радиационного контроля.

Особенности СРК МПЭБ:

1. Применение методики принятия управленческих решений оператором РУ на базе текущих и прогнозных значений радиационных и нерадиационных параметров о состоянии радиационной обстановки МПЭБ.

2. Применение для формирования каждого управляющего сигнала, передаваемого в СУ РУ МПЭБ, трех устройств детектирования, контролирующими соответствующие связанные радиационные параметры, реализованных на различных физических принципах, при этом устройства детектирования и обработки информации получают электропитание по разным фидерам, а сигнал управления формируется, если поступил сигнал как минимум от двух датчиков в соответствии с правилом «2 из 3».

3. Независимые каналы обработки информации с блоков детектирования, реализованные в централизованных УНО, для повышения надежности системы, ее ремонтпригодности и снижения стоимости системы.

4. Возможность управления блоками сигнализации, установленными в помещениях МПЭБ, по сигналам, формируемым по показаниям в определенных точках контроля вне зависимости от работоспособности ЦПРК и канала связи с верхним уровнем.

5. Использование в качестве внутреннего для информационного обмена в УНО интерфейса CAN, обеспечивающего мультимастерный обмен информацией на шине в многоконтроллерной системе и характеризующийся высокой скоростью передачи данных и помехоустойчивостью, повтором ошибочных сообщений, отключением неисправных узлов от обмена по шине.

## **Сравнение и гармонизация отечественных и международных нормативных документов, регламентирующих разработку и внедрение цифровых систем контроля и управления АС**

И.Д. Ракитин, д.т.н. **С.Б. Чебышов**

АО «СНИИП» – Москва, Россия

В докладе проанализированы соответствия и расхождения между отечественными и основными международными системами стандартов, НТД и руководств по цифровым системам контроля и управления АС. Рассмотрены системы документов Международной электротехнической комиссии (МЭК), Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ), Комиссии по ядерному регулированию (NRC) США, Института инженеров по электротехнике и электронике (IEEE) США, и др. Сформулированы рекомендации как по номенклатуре и содержанию разрабатываемых (корректируемых) в российской атомной отрасли нормативных и методических документов по стандартизации, так и по их гармонизации с международными системами и документами.

## **Comparison and Harmonization of Domestic and International Regulatory Documents Regulating the Development and Implementation of Digital Instrumentation and Control Systems of Nuclear Power Plants**

I.D. Rakitin, Dr. **S.B. Chebyshov**

JSC "SNIIP" – Moscow, Russia

The report analyzes the correspondences and discrepancies between domestic and major international systems of standards, regulating documents, guides and manuals on digital instrumentation and control systems of nuclear power plants (NPPs). The systems of documents of the International Electrotechnical Commission (IEC), the International Atomic Energy Agency (IAEA), the Nuclear Regulatory Commission (NRC) of the USA, the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) of the USA, etc. are considered. Recommendations are formulated both on the nomenclature and content of normative and methodological documents on standardization being developed (and/or corrected) in the Russian nuclear industry, and on their harmonization with international systems and documents.

### **Различные системы стандартов**

В мире существуют две крупнейшие международные организации, разрабатывающие стандарты в области ядерного приборостроения и АСУ ТП АЭС. Это – Международная электротехническая комиссия (МЭК) и Институт инженеров в области электротехники и электроники (IEEE), долгое время работающие независимо друг от друга. В связи с этим трудно составить общую иерархическую схему для системы стандартов этих двух организаций. Различные третьи страны, развивающие или планирующие использовать атомную энергетику, ориентируются либо на стандарты МЭК (ЕЭС, ряд стран Азии) либо на IEEE (США, Канада, Южная Америка, Южная Корея и большинство стран Азии).

Наконец, отдельно стоит Российская Федерация, унаследовавшая от СССР вместе с мощнейшим атомным промышленным комплексом еще и особую систему ГОСТов и нормативной

документации (НТД), по ряду базовых понятий и принципов совершенно «перпендикулярную» обеим международным системам.

Обозначения ГОСТ относятся к стандартам, принятым еще в советское время. Стандарты, принятые уже в РФ, имеют обозначение ГОСТ Р. Наконец, стандарты, являющиеся строгими аутентичными и официально утвержденными переводами международных стандартов, носят их обозначения (например, ГОСТ Р МЭК, ГОСТ Р ISO и т.п.).

Причины «собственного отечественного пути» понятны и объяснимы, исходя из автономного и независимого пути развития отечественной атомной индустрии и энергетики. Причем это не означает априори какой-либо «ущербности» отечественных стандартов, и отдельные их представители являются даже более совершенными как функционально, так и логически. Однако следует признать, что значительная часть отечественных стандартов устарела и доставляет значительные затруднения для экспорта российских атомных технологий, включая АЭС.

Устранение такой «рассогласованности» вызывает серьезную обеспокоенность экспертов [1,2] и руководителей отечественной атомной отрасли. Уже в 2012 г. Росстандарт создал Технический комитет ТК 322 «Атомная техника» с главной задачей под названием «*гармонизация российских и международных стандартов*». В рамках ТК 322 соответствующие задачи решает подкомитет ПК 7 «Автоматизированные системы управления технологическими процессами атомных станций».

### **Стандарты МЭК, IEEE и требования МАГАТЭ и NRC**

Стандарты МЭК для электротехнических и электронных систем и оборудования, важных для безопасности АЭС, разрабатываются в подкомитете ПК 45А «Контроль и управление на ядерных объектах» Технического комитета ТК 45 «Ядерное приборостроение».

В 1981 году было достигнуто официальное Соглашение о сотрудничестве между МАГАТЭ и ТК 45 МЭК, где, в частности, определено, что МАГАТЭ является международной организацией, ответственной за разработку принципов безопасности (в виде Правил и Руководств МАГАТЭ [3, 4, 5, 6, 7]), а Технический комитет ТК 45 МЭК является ответственным за разработку требований к проектированию, реализующих эти принципы в виде стандартов, разрабатываемых и корректируемых в подкомитете 45А в виде требований к системам контроля и управления (СКУ), важным для безопасности АЭС.

Поэтому Правила и Руководства МАГАТЭ следует отнести к документам высшего уровня иерархии по сравнению со стандартами МЭК, причем наивысший уровень иерархии имеют документы SSR-2/1 и SSR-2/2. Следующий уровень занимает документ SSG-30, развивающий и детализирующий общие положения документа SSR-2/1. Эти три документа относятся ко всем системам АЭС, важным для безопасности, а не только к системам контроля и управления. Ниже по уровню иерархии находятся два документа МАГАТЭ, относящиеся непосредственно к системам контроля и управления и к программному обеспечению систем, важных для безопасности АЭС.

В серии стандартов ПК 45А до 2020 года единственным документом первого (наиболее высокого) уровня иерархии являлся стандарт МЭК 61513. В этом стандарте рассматриваются требования к системам контроля и управления, важным для безопасности АЭС, и он лежит в основе серии стандартов ПК 45А. В 2020 году был принят еще один стандарт первого (наиболее высокого) уровня иерархии. Это стандарт МЭК 63046. В этом стандарте рассматриваются основные требования к электротехническим системам и системам электропитания, обеспечивающим системы контроля и управления, важные для безопасности АЭС, и он теперь также лежит в основе серии стандартов ПК 45А.

В двух обобщающих («главных») стандартах первого уровня МЭК 61513 и МЭК 63046 имеются непосредственные ссылки на другие стандарты ПК 45А, детализирующие и конкретизи-



рующие такие общие вопросы, как категоризация функций и классификация систем, оценка соответствия, защита от отказов по общей причине, аспекты программного и технического обеспечения, проектирование пунктов управления и кибербезопасность.

Те стандарты, на которые имеются непосредственные ссылки из стандартов МЭК 61513 и МЭК 63046, относятся ко второму уровню иерархии.

Прочие стандарты ПК 45А, на которые в стандартах МЭК 61513 и МЭК 63046 нет непосредственных ссылок, относятся к низшему (третьему) уровню.

Отметим, что иерархическая структура построения стандартов IEEE, таких, например, как [8, 9], подчиняется требованиям Регулирующей комиссии США (NRC), а документ NRC 10 CFR 50 [10] является высшим документом NRC в части требований к проектированию атомных станций и, в некотором смысле, аналогичен документу МАГАТЭ SSR-2/1 [3].

В РФ наиболее важными нормативными правовыми документами для обеспечения безопасности при разработке, создании, эксплуатации и сопровождении АСУ ТП АЭС являются НП-001-15 [11] и НП-026-16 [12].

### **Требования к разработке цифровых систем безопасности АЭС**

В отечественной нормативной базе, к сожалению, до сих пор нет руководящих документов, устанавливающих общие требования к разработке компьютерных систем безопасности АЭС. Поэтому было выполнено сравнение критериев и требований по безопасности, изложенных в IEEE (стандарты Std 603-1998 [7] и Std 7-4.3.2-1993 [8]) с критериями и требованиями аналогичных российских стандартов и ФНП [11, 12, 14, 15].

Проведенный анализ показал, что стандарты IEEE являются хорошо структурированными и сбалансированными документами высшего уровня, в которых описаны основные критерии, а также общие функциональные и проектные требования к управляющей и измерительной частям систем безопасности всех типов.

В российских стандартах часто не соблюдается системный и сбалансированный подход и принятые в международном сообществе терминология (определения системы защиты, квалификации оборудования, эксплуатационных байпасов и т.п.) и классификация. Например, классификация систем и категоризация функций по их важности для безопасности АЭС проводятся отдельно. Это – одна из причин, по которым гармонизация российских и международных стандартов является весьма непростой задачей.

В большинстве случаев критерии и требования, изложенные в IEEE, являются даже более строгими, чем в российских стандартах. Например: проведение защитных мероприятий; качество; независимость в отношении физического разделения и барьеров для каналов системы безопасности, и еще более 10 критериев.

Однако есть несколько важных случаев, когда требования российских стандартов являются более строгими, например:

1. Критерий единичного отказа (степень резервирования) – требования превышают простое применение критерия единичного отказа для системы аварийной защиты: в соответствии с этим стандартом должно быть, как минимум, две независимых группы устройств защиты, каждая из которых должна содержать 3 независимых канала для защиты реактора по возрастанию нейтронной мощности и по скорости ее возрастания с логикой голосования, как минимум, 2 из 3 для каждой такой группы;

2. Надежность – в российских стандартах и ФНП приведены более детальные и строгие требования по вероятностной оценке безопасности с установлением допустимых вероятностей возможных инцидентов. Требуется проведение количественной оценки надежности СУЗ, причем отказ при выполнении функции аварийного останова – не более  $10^{-5}$ , среднее время между отказами системы управления – не менее  $10^5$  часов, а среднее время ремонта – не более 1 часа.

### Неотложные задачи по гармонизации стандартов

Анализ показал, что стандарты IEEE Std 603-1998 и IEEE Std 7-4.3.2-1998 можно рекомендовать как «ГОСТ Р IEEE» для адаптации в российские системы НТД. Они являются более полными и непротиворечивыми для проектировщиков систем безопасности (и их программно-инструментальной части), чем существующие российские стандарты и ФНП.

Как отмечалось выше, к единственному документу ПК 45А **первого** (наиболее высокого) уровня иерархии МЭК 61513 [16], недавно включенному в российскую систему как ГОСТ Р МЭК 61513, в 2020 году был добавлен второй стандарт МЭК 63046 [17], который теперь также лежит в основе серии стандартов ПК 45А. Поэтому весьма актуальной становится и его адаптация как ГОСТ Р МЭК 63046.

### Список литературы

1. В.П. Сивоконь, И.Д. Ракитин, С.А. Шумов. Сравнительный анализ российских и международных стандартов в области компьютеризированных систем контроля и управления, используемых на атомных электростанциях/ «Ядерные измерительно-информационные технологии». – 2008. – №4 (28). – С. 43–53.
2. Sivokon V.P., Rakitin I.D., Shumov S.A. A Comparative Analysis of the Russian and International Standards Using for NPP Digital Computerized Systems. In Proc. of 6th International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Controls, and Human Machine Interface Technology (NPIC&HMIT 2009). April 05-09, 2009, Knoxville, TN, USA.
3. IAEA Safety Standards Series No.SSR-2/1. Safety of Nuclear Power Plants: Design. Specific Safety Requirements. 2012. Revised 2016. Безопасность АЭС: проектирование. Специальные Требования по безопасности. 2012 г. Ревизия 2016 г.
4. IAEA Safety Standards Series. No. SSR-2/2 (Rev. 1). Safety of Nuclear Power Plants: Commissioning and Operation. Specific Safety of Nuclear Power Plants: Commissioning and Operation. Specific Safety Requirements. 2016. Безопасность АЭС: ввод в эксплуатацию и эксплуатация. Специальные Требования по безопасности. 2016 г.
5. IAEA Safety Standards Series No. SSG-30. Safety Classification of Structures, Systems and Components in Nuclear Power Plants. Specific Safety Guide. 2014 г. Классификация по безопасности для структур, систем и компонентов атомных электростанций. Специальное Руководство по безопасности. 2014 г.
6. IAEA Safety Standards Series No. SSG-39. Проектирование систем контроля и управления для атомных электростанций. Специальное Руководство по безопасности. 2016 г.
7. IAEA Safety Standards Series No.SSG-54. Accident Management Programmes for Nuclear Power Plants. Specific Safety Guide. 2019. Программы управления авариями на атомных электростанциях. Специальное Руководство по безопасности. 2019 г.
8. IEEE Стандарт 603-1998 «Критерии для систем безопасности атомных электростанций. Описание».
9. IEEE Std 7-4.3.2-1993 «Критерии для цифровых компьютеров в системах безопасности АЭС».
10. Nuclear Regulatory Commission 10 CFR 50: Общие критерии при проектировании атомных станций.
11. Федеральные нормы и правила НП-001-15: Общие положения обеспечения безопасности атомных станций (ОПБ).
12. Федеральные нормы и правила НП-026-16: Требования к управляющим системам, важным для безопасности атомных станций.
13. МЭК 61226 Изд. 4: 2020. «Атомные электростанции. Системы контроля и управления и электротехнические системы, важные для безопасности. Категоризация функции контроля и управления».
14. Федеральные нормы и правила НП-087-07: Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций.
15. ГОСТ 26843-86 «Реакторы ядерные энергетические. Общие требования к системе управления и защиты».
16. МЭК 61513 Изд. 2: 2011, ГОСТ Р МЭК 61513: 2020. «Атомные электростанции. Системы контроля и управления, важные для безопасности. Общие требования».
17. МЭК 63046: 2020. «Атомные электростанции. Контроль, управление и электротехническое оборудование, важные для безопасности. Общие требования к электротехническим системам».



Сборник трудов  
Научно-практической конференции  
«Физико-технические интеллектуальные системы»  
(ФТИС-2022)

Верстка, дизайн: Д.Ю. Жуков  
Корректор: А.В. Жукова

Подписано в печать 27.05.2022.    Формат 60х90/8  
Печ. л. 38,5.    Уч.-изд. л. 27.    Тираж 300 экз.  
Заказ №049-22

Издательство ООО «Буки Веди»  
117246, г. Москва, проезд Научный, д. 19, этаж 2, ком. 6Д, оф. 202  
+7 (495) 926-63-96, [www.bukivedi.com](http://www.bukivedi.com), [info@bukivedi.com](mailto:info@bukivedi.com)

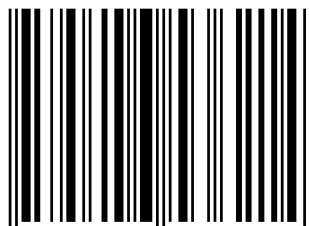


Национальный исследовательский ядерный университет  
«МИФИ»

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский  
институт автоматики им. Н.Л. Духова»



ISBN 978-5-4465-3621-4



9 785446 536214 >