

На правах рукописи



Алексеев Александр Сергеевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРВИЧНЫХ
ОПТИКО-ВОЛОКОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ
РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ**

Специальность: 05.13.05 — Элементы и устройства вычислительной техники
и систем управления

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ульяновск – 2021

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет».

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор

Светухин Вячеслав Викторович

Официальные оппоненты:

Тимошенко Сергей Петрович,
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники, Институт нано- и микросистемной техники, директор

Антонец Иван Васильевич,
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева», кафедра авиационной техники, профессор кафедры

Ведущая организация – **Ульяновский филиал института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, г.Ульяновск**

Защита состоится «29» сентября 2021 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.277.04 при ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет» по адресу: 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32 (ауд. 211, Главный корпус).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет». Диссертация и автореферат размещены на сайте <http://www.ulstu.ru/>.

Автореферат разослан «_____» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, доцент



Наместников
Алексей Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

В настоящее время проблема радиационной безопасности объектов атомной энергетики стоит особенно остро. При этом контроль радиационной обстановки и управление исполнительными механизмами и системой оповещения, как правило, осуществляется посредством специальных автоматизированных систем. Однако, требования к подобным системам существенно возросли. Появились новые объекты мониторинга, ранее не рассматриваемые в качестве представляющих опасность. Качество и достоверность результатов радиационного контроля таких объектов необходимы для своевременного принятия решений по устранению опасных для жизни человека и окружающей среды последствий. При этом, автоматизация процессов контроля и измерения параметров, характеризующих состояние источников ионизирующих излучений, реакторной техники, технологических процессов получения изотопов, радиационных источников для ядерной медицины, распределенных радиационных полей, хранилищ и захоронений радиоактивных материалов, сухих и мокрых хранилищ отработанного ядерного топлива, конструкций и строений (реакторные помещения) и др. требует разработки новых типов преобразователей для применения в новых высокоэффективных дистанционных точечных и распределенных системах радиационного контроля и управления.

Одним из перспективных направлений в решении этой задачи является разработка оптико-волоконных преобразователей и автоматизированных систем радиационного контроля и управления на их основе. Использование подобного рода преобразователей и систем позволяет в большинстве случаев решить вопросы длительного временного, пространственно-распределенного, а также пооперационного мониторингов физических параметров, определяющих безопасность процессов в атомной отрасли, и осуществлять эффективное управление сигнализацией и исполнительными механизмами.

Степень разработанности темы исследования.

Несмотря на наличие нескольких формирующихся научно-технических подходов в направлении разработки волоконных преобразователей, чувствительных к радиационному излучению и систем радиационного контроля и управления, в рамках которого свой вклад внесли зарубежные исследователи: Krebber K., Fernandez F.A., Maier R.J., MacPherson W.N., Barton J.S., Mckenzie I., Berghmans F, Beddar A.S., Carrasco P., Jornet N., Jordi O., Wootton L, Beierholm A.R., O'Keefe S., Beaulieu L., Guillot M., Hashim S., Toh K., Bartesaghi G., Nakajima D., Naka R. и др., а также отечественные ученые: Гусаров А.И., Васильев С.А., Стародубов Д.С., Томашук А.Л., Греков М.В. и др. недостаточно разработанным остаётся ряд задач, связанных с разработкой первичных волоконных преобразователей для измерения мощности дозы радиационного излучения, активности и пространственного положения

радиационных источников и построением многоканальных систем радиационного контроля и управления на их основе. В разработку методов решения модельных задач радиационного переноса внесли вклад следующие исследователи: Панин М.П., Далечина А.В., Литвинцев К.Ю., Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н., Юферев В.С., М.Г.Васильев, Проэкт Л.Б, Руколайне С.А., Кучин Н.Л., Алексеев А.В., Беляков И.М, Бочков А.И., Сушкевич Т.А., Басс Л.П., Николаева О.В., Кузнецов В.С., Шагалиев Р.М., Lockwood F.C., Shah N.G., Chandrasekhar S.. При этом возможность применения методов Монте-Карло изучалась Жуковским М.Е, Соловьевым А., Климановым В.А., Чирской Н.П., Ulam S.M, Metropolis N. Однако, разработка новых волоконных преобразователей в каждом отдельном случае с учетом различных граничных условий требует применения новых численных моделей с использованием методов Монте-Карло для расчета их выходных параметров. Функции управления сигнализацией и исполнительными механизмами в рамках автоматизированных систем радиационного контроля затронуты в работах Scibile L., Perrin D., Millan G., Widorski M., Buruiana V., Oprea M., Мягкова С., Шустова В., Левина Е., однако, на текущий момент примеров автоматизированных волоконных систем радиационного контроля с такими возможностями в литературе не представлено.

Цель работы.

- разработка и исследование новых оптико-волоконных преобразователей радиационного излучения с улучшенными эксплуатационными характеристиками, в том числе с расширенными функциональными возможностями, позволяющими определять мощность дозы гамма- радиационного излучения, активность и положение бета-радиационных источников для применения в многоканальных автоматизированных системах радиационного контроля и управления.

Поставленная цель достигается решением **следующих задач:**

1. Разработка, моделирование и экспериментальные исследования нового первичного оптико-волоконного преобразователя для измерения активности радиационных источников бета-излучения;

2. Разработка, моделирование и экспериментальные исследования нового первичного оптико-волоконного преобразователя для измерения мощности дозы радиационного гамма-излучения;

3. Разработка, моделирование и экспериментальные исследования нового первичного оптико-волоконного преобразователя для определения положения точечного радиационного источника бета-излучения;

4. Разработка многоканальной системы радиационного контроля и управления с использованием новых первичных оптико-волоконных преобразователей в качестве элементов системы с возможностью расширения функционала за счет подключения дополнительных волоконных преобразователей;

Научная новизна работы.

1. Впервые предложены оптико-волоконный преобразователь для измерения активности радиационных источников бета-излучения с чувствительным

элементом на основе сцинтилляционного волокна и новая численная модель взаимодействия сцинтилляционного волокна с бета-излучением, учитывающая параметры радиационного источника, конструкции волоконного преобразователя и их взаимного расположения, с помощью которой получена калибровочная функция преобразования, имеющая линейный вид;

2. Предложены новый оптико-волоконный преобразователь для определения мощности дозы радиационного гамма-излучения с чувствительным элементом на основе комбинации пластикового сцинтиллятора и спектросмещающего волокна и новая численная модель, описывающая взаимодействие чувствительного элемента с гамма-излучением с учетом параметров радиационного источника, конструкции волоконного преобразователя и их взаимного расположения, с помощью которой рассчитаны параметры чувствительного элемента, при которых крутизна функции чувствительности преобразователя имеет наибольшее значение;

3. Предложен новый оптико-волоконный преобразователь для определения положения точечного радиационного бета-источника с чувствительным элементом, содержащим сцинтилляционное волокно, позволяющий проводить измерения мощностей оптических сигналов на выходах преобразователя, которые интерпретируются в значения координаты положения радиационного источника с помощью специально разработанной новой математической модели, основанной на ранее не применявшемся эффекте ослабления оптического сигнала в волокне;

4. Предложена новая многоканальная оптико-волоконная система радиационного контроля и управления, позволяющая комплексировать измерительную информацию с удаленных оптико-волоконных преобразователей различных видов радиационного излучения, подключаемых универсальным образом, при этом функциональное назначение преобразователей определяется программно с использованием соответствующих численных и математических моделей.

Практическая значимость работы.

1. Разработаны новые первичные оптико-волоконные преобразователи мощности дозы радиационного излучения, активности и положения радиационных источников, которые могут быть применены в составе предложенной системы радиационного контроля и управления или аналогичной;

2. Разработана новая оптико-волоконная многоканальная система радиационного контроля и управления с оптическим интерфейсом для реализации возможности подключения волоконных сенсорных элементов различных типов, позволяющий дистанционно проводить измерения в целях контроля радиационной обстановки на объектах атомной отрасли, в частности, в сухих хранилищах отработанного ядерного топлива.

3. Разработано встроенное программное обеспечение для микроконтроллерной системы, входящей в состав измерительного блока, которое реализует подсчет электрических импульсов, поступающих со счетчика фотонов, которое

может быть использовано при программировании микропроцессорных систем аналогичного назначения;

4. Разработано кроссплатформенное программное обеспечение для персонального компьютера, которое управляет сбором измерительной информации, реализует нахождение калибровочной функции для сенсорного элемента в соответствии с расчетной моделью и экспериментальными данными, отображение результатов измерений в единицах активности, мощности дозы, координат, которое может найти практическое применение на объектах атомной отрасли;

5. Разработано программное обеспечение для одноплатного микрокомпьютера, которое управляет сбором измерительной информации, реализует нахождение калибровочной функции для сенсорного элемента в соответствии с расчетной моделью и экспериментальными данными, отображение результатов измерений в единицах активности, мощности дозы, координат с возможностью сенсорного управления, которое может быть адаптировано для практических приложений, связанных с мониторингом параметров различных радиационных источников и выработкой соответствующих сигналов управления на его основе;

6. Разработано программное обеспечение для реализации численной модели для первичного волоконного преобразователя для измерения активности источников бета-излучения в составе системы радиационного мониторинга, которое может быть использовано для расчета конструкции и калибровки аналогичных волоконных сенсорных элементов;

7. Разработано программное обеспечение для реализации численной модели первичного волоконного преобразователя для измерения мощности дозы радиационного гамма-излучения в составе системы радиационного контроля и управления, которое может быть использовано для расчета конструкции и калибровки аналогичных волоконных сенсорных элементов.

Методы исследований.

При выполнении работы использовались методы синтеза и анализа, математического и численного моделирования, теории статистики, теории вероятности. При разработке программного обеспечения использовался язык программирования C, C++, компиляторы GCC (Linux), библиотеки для численного моделирования Geant4.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Оптимизированная по максимуму чувствительности, предложенная конструкция нового первичного оптико-волоконного преобразователя на базе сцинтилляционного волокна с чувствительностями 1,96 имп./мКи/с, 45,3 имп./мКи/с, 6,27 имп./мКи/с к энергетическим спектрам излучения радиоизотопов ^{63}Ni , ^{89}Sr , ^{90}Sr соответственно позволяет проводить измерения мощности оптического сигнала, наведенного источником радиационного излучения, а его численная модель позволяет определить калибровочную функцию и интерпретировать результаты измерения мощности оптического сигнала в единицы активности в диапазоне 0-100 мКи;

2. Оптимизированная по максимуму чувствительности, предложенная

конструкция нового первичного оптико-волоконного преобразователя с использованием комбинированного сенсорного элемента на базе пластикового сцинтиллятора и спектросмещающего волокна с чувствительностью $3,23 \cdot 10^5$ имп./мГр к рентгеновскому и радиационному гамма-излучению позволяет проводить измерения мощности оптического сигнала, наведенного источником радиационного излучения, его численная модель позволяет определить калибровочную функцию и интерпретировать результаты измерения в единицы мощности дозы гамма-излучения в диапазоне 0-17 мГр/с;

3. Предложенная конструкция нового волоконного преобразователя на основе эффекта ослабления оптического сигнала в сцинтилляционном волокне с чувствительностью $0,0219 \text{ см}^{-1}$ позволяет проводить измерения мощностей оптических сигналов, наведенных точечным источником радиационного бета-излучения, а его математическая модель позволяет интерпретировать результаты измерений мощностей оптических сигналов на выходах преобразователя в значения координаты при длине сенсорного элемента до 5 м;

4. Предложенная новая многоканальная оптико-волоконная система радиационного контроля и управления, включающая первичные волоконные преобразователи мощности дозы радиационного излучения, активности и положения радиационных источников с унифицированными оптическими интерфейсами обеспечивает возможность расширения функционала за счет подключения новых элементов (первичных волоконных преобразователей) и определения для них специальных калибровочных функций на основе численных и математических моделей.

Степень достоверности и апробация работы.

Достоверность работы подтверждается на основе результатов математического и численного моделирования конструкций предложенных волоконных преобразователей, соответствием данных, полученных в процессе экспериментальных исследований практически реализованных образцов предложенных волоконных преобразователей результатам моделирования, практической реализацией образцов предложенной в работе многоканальной волоконно-оптической системы радиационного контроля и управления. Результаты, полученные в процессе написания диссертационной работы были доложены и обсуждались на следующих конференциях: The 2015 2nd International Conference on Advanced Engineering Technology (Южная Корея, Инчхон, 2015г.), Научно-технической конференции «Институту реакторных материалов 50 лет» (г.Екатеринбург, 2017г.), «Всероссийской конференции по волоконной оптике - 2017» (г.Пермь, 3-6 октября 2017г.), Международной научно-практической конференции «Ядерная медицина и лучевая терапия: современное состояние и ближайшие перспективы» (г.Москва, 7 декабря 2017г.), VII Международной конференция по фотонике и информационной оптике (г.Москва, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 24-26 января 2018г.), International Scientific-Practical Conference «INFORMATION INNOVATIVE TECHNOLOGIES» (Prague, 2018г.), XV Всероссийский молодежный Самар-

ский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике (Самара, 13-17 ноября 2018г.), «Всероссийской конференции по волоконной оптике - 2019» (г.Пермь, 8-11 октября 2019г.).

Реализация и внедрение результатов работы.

Результаты диссертационной работы учитывались в НИТИ им. С.П.Капицы УлГУ в ходе разработки оптоволоконной системы мониторинга состояния сухого хранилища отработанного ядерного топлива при проведении исследований по тематическим планам НИР («Разработка оптоволоконных систем мониторинга состояния сухих хранилищ отработанного ядерного топлива», соглашение - №14.577.21.0074 от 05.06.2014г., шифр - 2014-14-579-0005-014).

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 27 работ, в том числе 9 статей в научных изданиях из перечня ВАК Минобрнауки РФ, получено 5 патентов на изобретения и полезные модели.

Личный вклад автора.

Все отраженные в диссертации результаты, включая разработанные конструкции предложенных волоконных преобразователей для измерения мощности дозы радиационного излучения, активности и положения радиационных источников, реализованные в экспериментальных образцах, их математические и численные модели, блок-схемы алгоритмов и их реализации в расчетных и управляющих программах, предложенную волоконно-оптическую систему радиационного контроля и управления и ее экспериментальные образцы, результаты экспериментальных исследований получены лично автором. При подготовке полученных результатов к публикации в соавторстве вклад автора имел определяющее значение.

Структура и объем диссертации.

Диссертация содержит введение, пять глав, заключение, библиографию и 1 приложение. Общий объем диссертации - 159 страниц, из них 133 страницы текста, включая 51 рисунок. Библиографический список включает 225 пунктов на 25 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В первой главе диссертации рассмотрены существующие на сегодняшний день первичные преобразователи, устройства и системы радиационного контроля и управления, прежде всего различные виды оптических волоконных преобразователей, их основные характеристики и параметры, а также типовые схемы организации систем на их основе, определены цели и задачи исследования.

Проведённый анализ показал, что волоконные системы радиационного контроля и управления имеют следующие преимущества: возможность детектирования различных видов радиационного излучения, возможность проведения непрерывных измерений в реальном времени, возможность удалённого мониторинга и мультиплексирования, электромагнитная помехозащищённость, линейный характер отклика, гибкость волокна позволяет разрабатывать сенсоры различной геометрической конфигурации, сенсоры не требуют электрического питания, радиационная стойкость.

При этом установлено, что для решения задач, связанных с определением мощности дозы радиационного излучения, активности и положения источников радиационного излучения различных видов требуются разработка, моделирование и исследование новых первичных преобразователей на основе специальных оптических волокон и оптико-волоконных систем радиационного контроля и управления на базе таких преобразователей, обладающих свойствами многоканальности, универсальности, модульности и расширяемости.

Во второй главе представлены конструкция нового первичного волоконного преобразователя для регистрации активности радиационных источников бета излучения и его численная модель. Модель использует для расчета численные методы Монте-Карло и учитывает упругие и ионизационные столкновения, тормозное излучение. Применение численных методов Монте-Карло обосновано высокой параметризацией задачи, низкой статистической погрешностью результатов расчетов и относительной доступностью в настоящее время быстродействующих многопроцессорных вычислительных систем. В модели используются библиотеки экспериментальных данных Livermore, в частности EEDL (Evaluated Electrons Data Library), которые предназначены для расчетов взаимодействий для низкоэнергетических излучений. Универсальный способ расчета полного сечения взаимодействия с использованием библиотечных данных и интерполяции выглядит следующим образом:

$$\log(\sigma(E)) = \frac{\log(\sigma_1) \log(E_2/E) + \log(\sigma_2) \log(E/E_1)}{\log(E_2/E_1)},$$

где E - актуальная энергия, E_1 и E_2 - соответственно меньшее и большее значения энергии, для которых данные о сечениях σ_1 и σ_2 доступны. Для других процессов метод интерполяции выбирается в зависимости от формы сечения взаимодействия. Так, для сечения взаимодействия ионизации выборка происходит следующим образом:

$$\sigma(T) = \sum_s \left(\sigma_s(T) \frac{\int_{T_c}^{T_{max}} t \frac{d\sigma}{dt} dt}{\int_{T_{min}}^{T_{max}} t \frac{d\sigma}{dt} dt} \right),$$

где $T_{max} = 0,5T$ - максимальная энергия переданная вторичному электрону, T_c - порог генерации вторичного электрона для данного материала, $\sigma_s(T)$ - полное сечение взаимодействия для оболочки s при данной кинетической энергии падающей частицы T и $T_{min} = 0,1$ эВ - это нижний энергетический порог для базы EEDL. Для тормозного излучения:

$$\sigma = \sigma(T) \frac{\int_{\omega_c}^T \frac{d\sigma}{d\omega} d\omega}{\int_{T_{min}}^T \frac{d\sigma}{d\omega} d\omega},$$

где $\sigma(T)$ - полное сечение при данной кинетической энергии падающей частицы, ω_c - энергетический порог, при достижении которого генерируется гамма-фотон.

Модель позволяет проводить оптимизацию конструкции волоконного преобразователя с учетом следующих параметров: количество, активность, энергетический спектр и геометрическая форма радиационных источников; геометрия, конструкция, эффективность сцинтилляционного волокна и получать выходные калибровочные функции для использования в составе системы радиационного контроля и управления, а также проводить предварительные численные эксперименты с источниками радиационного излучения.

На рисунке 1а приведена модель чувствительного элемента волоконного преобразователя и расположение элементов в численном эксперименте. Пластиковый цилиндр 1, на боковой поверхности которого размещены радиационные источники 2, помещался в центр круглого отверстия в корпусе сенсорного элемента. Цилиндр размещался в отверстии таким образом, чтобы активные поверхности источников были обращены к виткам сцинтилляционного волокна, расположенным на внутренней поверхности отверстия корпуса сенсорного элемента. Принцип действия волоконного преобразователя следующий: количество оптических фотонов на торце волокна в единицу времени пропорционально активности источника радиационного излучения.

Для реализации модели было разработано оригинальное программное обеспечение с использованием библиотек классов Geant4. На рисунке 2 представлен интерфейс и блок-схема алгоритма работы программы.

Экспериментальные исследования проводились с использованием радиационных источников на базе ^{63}Ni , ^{89}Sr , ^{90}Sr и экспериментального образца первичного оптико-волоконного преобразователя. Предварительно было выполнено численное моделирование экспериментов (рисунок 1б) на основе предложенной модели в реализации разработанного программного обеспечения и выбран

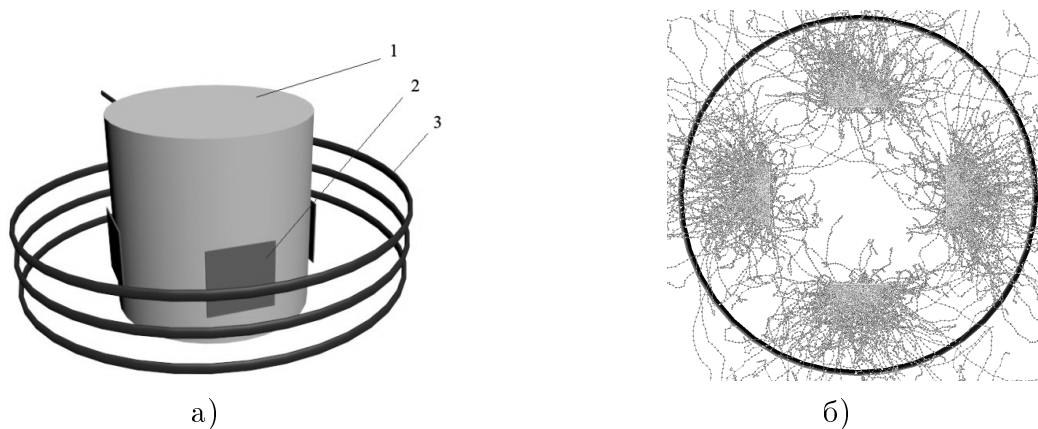


Рисунок 1 – Схема численного эксперимента (а) и визуализация траекторий в результате расчета (б)

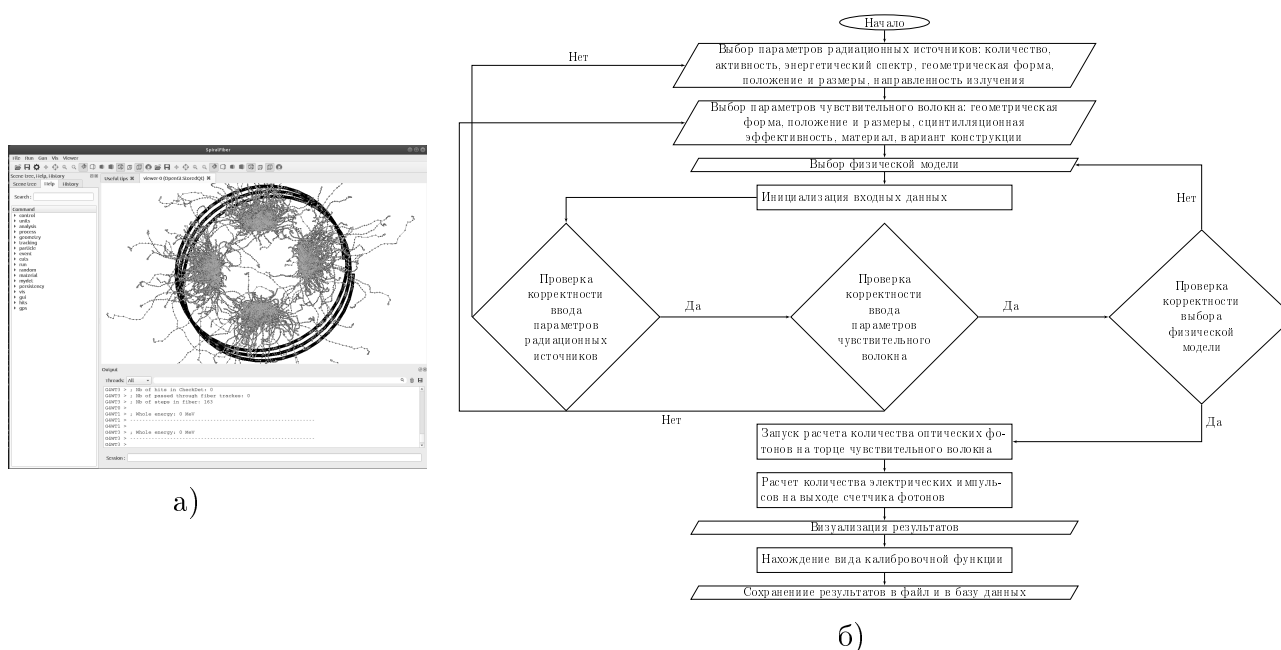


Рисунок 2 – Интерфейс (а) и блок-схема алгоритма работы программного обеспечения для реализации модели волоконного преобразователя (б)

наиболее эффективный вариант конструкции оптико-волоконного преобразователя с точки зрения максимума чувствительности, который далее был реализован в экспериментальном образце. Также в ходе моделирования для выбранного варианта конструкции преобразователя были определены соответствующие калибровочные функции.

На рисунке 3 приведены результаты экспериментальных измерений количеств импульсов, полученных в единицу времени на выходе счетчика фотонов, от активностей источников для ^{63}Ni , ^{89}Sr и ^{90}Sr в диапазоне 0-100 мКи, а также результаты расчета, выполненного при помощи рассмотренной модели. На рисунке 3 указаны также функции чувствительности экспериментального образца преобразователя к излучению перечисленных радиационных источников. Во всех случаях полученные экспериментальные данные в пределах погрешности измерения хорошо согласуются с результатами расчета.

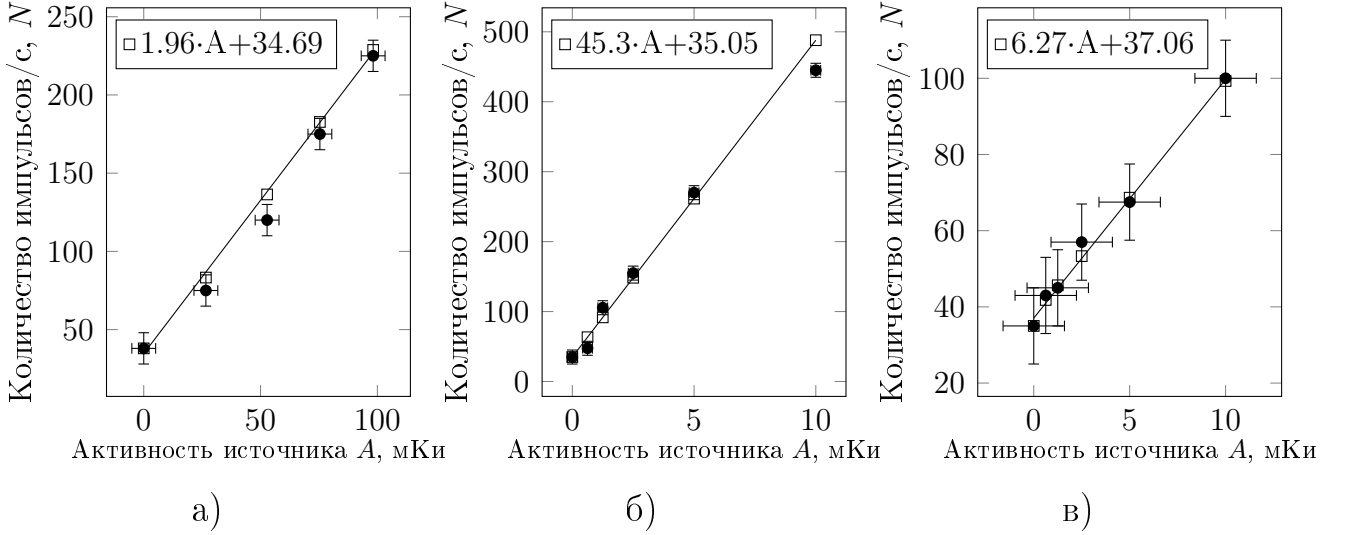


Рисунок 3 – Зависимости количеств импульсов, полученных за единицу времени на выходе счетчика фотонов, от активностей радиационных источников на основе ^{63}Ni , ^{89}Sr и ^{90}Sr (квадраты — расчет, круги — эксперимент)

В третьей главе представлены результаты разработки, моделирования и экспериментальных исследований нового первичного волоконного преобразователя для определения мощности дозы радиационного гамма-излучения. Модель взаимодействия предложенного преобразователя с радиационным излучением также разработана с использованием методов Монте-Карло в реализации классов Geant4. Модель учитывает следующие взаимодействия: фотоэффект, Комптоновское рассеяние, образование электрон-позитронных пар, сцинтилляционный эффект, эффекты спектрального смещения, оптического поглощения, отражения и преломления. При этом стандартное полное сечение на атом для образования электрон-позитронных пар в Geant4:

$$\sigma(Z, E_\gamma) = Z(Z + 1) \left[F_1(X) + F_2(X)Z + \frac{F_4(X)}{Z} \right],$$

где

$$F_1(x) = a_0 + a_1X + a_2X^2 + a_3X^3 + a_4X^4 + a_5X^5,$$

$$F_2(x) = b_0 + b_1X + b_2X^2 + b_3X^3 + b_4X^4 + b_5X^5,$$

$$F_3(x) = c_0 + c_1X + c_2X^2 + c_3X^3 + c_4X^4 + c_5X^5,$$

где Z - атомный номер материала среды, E_γ - энергия падающего фотона, $X = E_\gamma/mc^2$, m - масса электрона, параметры a_i, b_i, c_i - табличные коэффициенты для различных интервалов энергий.

Сечение взаимодействия для Комптоновского рассеяния:

$$\sigma(Z, E_\gamma) = \left[\frac{\log(1 + 2X)}{X} + \frac{P_2(Z) + P_3(Z)X + P_4(Z)X^2}{1 + aX + bX^2 + cX^3} \right],$$

где $P_i(z) = Z(d_i + e_iZ + f_iZ^2)$, d_i, e_i, f_i - табличные коэффициенты для различных интервалов энергий.

Сечение взаимодействия для фотоэффекта:

$$\sigma(Z, E_\gamma) = \frac{a(Z, E_\gamma)}{E_\gamma} + \frac{b(Z, E_\gamma)}{E_\gamma^2} + \frac{c(Z, E_\gamma)}{E_\gamma^3} + \frac{d(Z, E_\gamma)}{E_\gamma^4},$$

где a, b, c, d - коэффициенты, подбираемые из экспериментальных данных в нескольких энергетических интервалах.

Сечения для взаимодействия, связанного с упругим рассеянием рассчитывается с использованием Livermore-библиотек. Сцинтилляционные эффекты моделируются, опираясь на величины световыхода сцинтилляционного вещества и поглощенной веществом энергии. Оптический спектр фотонов задается на базе эмпирических данных для конкретного сцинтиллятора. Эффекты оптического поглощения, отражения и преломления симулируются с учетом типа границы двух сред: диэлектрик - диэлектрик, диэлектрик - металл, диэлектрик - "черный" материал (материал для которого не определен характер оптических свойств).

В основе моделируемой конструкции первичного волоконного преобразователя лежит листовый пластиковый сцинтиллятор, в котором при помощи лазера сделана спиральная канавка. В канавке заложено спектросмещающее волокно. Вся конструкция размещается в металлическом корпусе с отражающими внутренними поверхностями (рисунок 4).

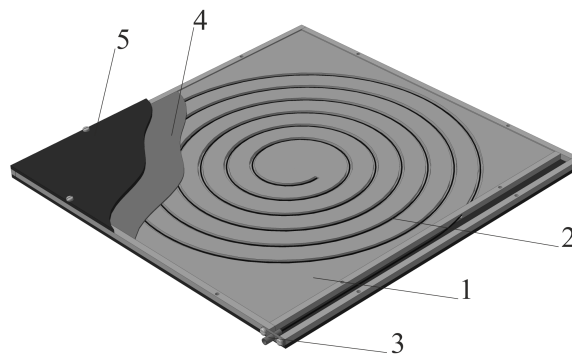


Рисунок 4 – Модель волоконного преобразователя для определения мощности дозы радиационного излучения: 1 - листовый пластиковый сцинтиллятор, 2 - спектросмещающее оптическое волокно 3 - оптический разъем, 4 - зеркало, 5 - корпус

Принцип действия рассматриваемого первичного волоконного преобразователя заключается в следующем: под воздействием ионизирующего гамма- или рентгеновского излучения в пластиковом сцинтилляторе генерируется оптическое излучение в установленном диапазоне длин волн. Затем это излучение вводится в спектросмещающее оптическое волокно, в котором происходит переизлучение в спектральном диапазоне, согласованном со спектром чувствительности фотоприемника, установленного в измерительном блоке. Количество оптических фотонов на выходе сенсорного элемента в единицу времени пропорционально мощности дозы источника ионизирующего излучения.

Изображение разработанного программного интерфейса для реализации численной модели, а также блок-схема алгоритма работы программы приведены на рисунке 5.

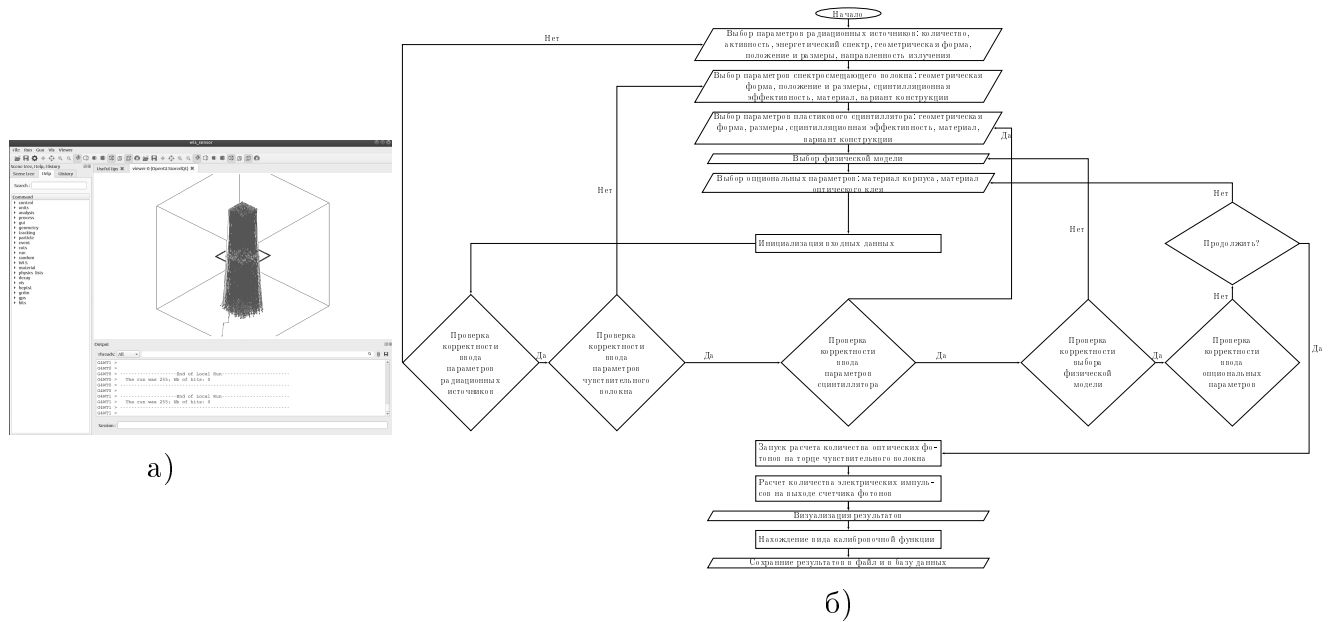


Рисунок 5 – Интерфейс (а) и блок-схема алгоритма работы программного обеспечения для реализации модели волоконного преобразователя (б)

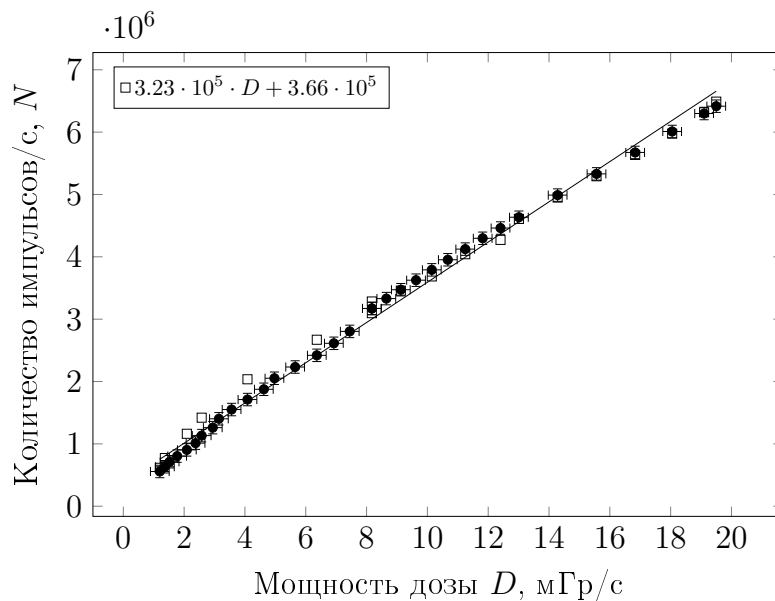


Рисунок 6 – Зависимость количества импульсов, полученных за единицу времени, от мощности дозы рентгеновского и гамма-излучения ^{60}Co , результаты экспериментальных исследований – круги и численного моделирования – квадраты.

С помощью предварительного численного моделирования удалось оптимизировать конструкцию предложенного оптико-волоконного преобразователя по максимуму чувствительности и определить вид его калибровочной функции. Дальнейшие исследования показали, что полученные экспериментальные

и расчетные данные для экспериментального образца первичного оптико-волоконного преобразователя показывают высокую чувствительность оптического датчика к рентгеновскому и гамма-излучению для энергий до 1,5 МэВ. Экспериментальные результаты хорошо согласуются с результатами моделирования. Для экспериментального образца оптико-волоконного преобразователя получена линейная зависимость количества импульсов от мощности дозы (функция чувствительности) для рентгеновского и гамма-излучений в диапазоне мощностей доз 1-17 мГр/с.

В четвертой главе описана конструкция нового первичного волоконного преобразователя для определения положения точечного радиационного источника бета-излучения на основе эффекта ослабления оптического сигнала в волокне для применения в составе системы радиационного контроля и управления и подробно рассмотрена его математическая модель.

Рассмотрим отрезок сцинтилляционного волокна длиной L , в произвольной точке X которого располагается точечный источник света так, что расстояние $OX = L_1$, а расстояние $XL = L_2 = L - L_1$ (Рисунок 7). С учетом поглощения, рассеяния, потерь на изгибах и стыках линейные показатели ослабления на участках OM и OL равны соответственно μ'_1 и μ'_2 .

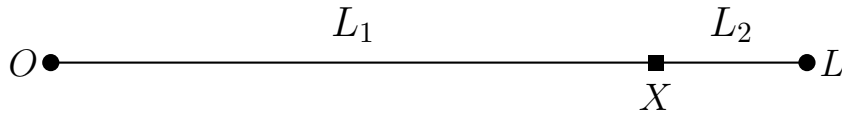


Рисунок 7 – Модель волоконного преобразователя для определения положения точечного радиационного источника

При этом законы ослабления оптического сигнала для приведенных участков будут выглядеть следующим образом:

$$P_1 = P_0 e^{-\mu'_1 L_1} \quad (1)$$

$$P_2 = P_0 e^{-\mu'_2 L_2}, \quad (2)$$

где P_1 и P_2 мощности оптического сигнала на выходах оптического волокна O и L соответственно, пропорциональные количествам оптических фотонов N_1 и N_2 . Разделив и прологарифмировав выражения 1 и 2, получим:

$$\ln \frac{P_1}{P_2} = \ln \frac{N_1}{N_2} = \mu'_2 L_2 - \mu'_1 L_1 = \mu'_1 L - (\mu'_1 + \mu'_2) L_1 = (\mu'_1 + \mu'_2) L_2 - \mu'_2 L, \quad (3)$$

Таким образом, получив экспериментально зависимость 3, можно определить линейные показатели ослабления μ'_1 и μ'_2 , что позволит в дальнейшем на основе подсчета оптических фотонов на выходах волокна определять положение точечного источника излучения. В случае, если $\mu'_1 = \mu'_2 = \mu'$ получим:

$$X = \frac{L}{2} \pm \frac{\ln \frac{N_1}{N_2}}{2\mu'} \quad (4)$$

При этом, если брать во внимание исключительно потери в оптическом волокне, можно считать, что μ' приблизительно соответствует по величине значению линейного показателя, указываемому производителем в спецификации волокна, а значит положение источника излучения может быть найдено, исходя из отношений количеств фотонов, зарегистрированных на выходах волокна, без дополнительных инструментальных измерений.

В целях проверки работоспособности конструкции и результатов моделирования позиционно-чувствительного оптико-волоконного преобразователя было выполнено его макетирование и проведены экспериментальные исследования полученного макета с чувствительным элементом длиной 5 м. Для подключения оптико-волоконного преобразователя было задействовано два входа оптического коммутатора.

На рисунке 8 представлены результаты проведённых исследований.

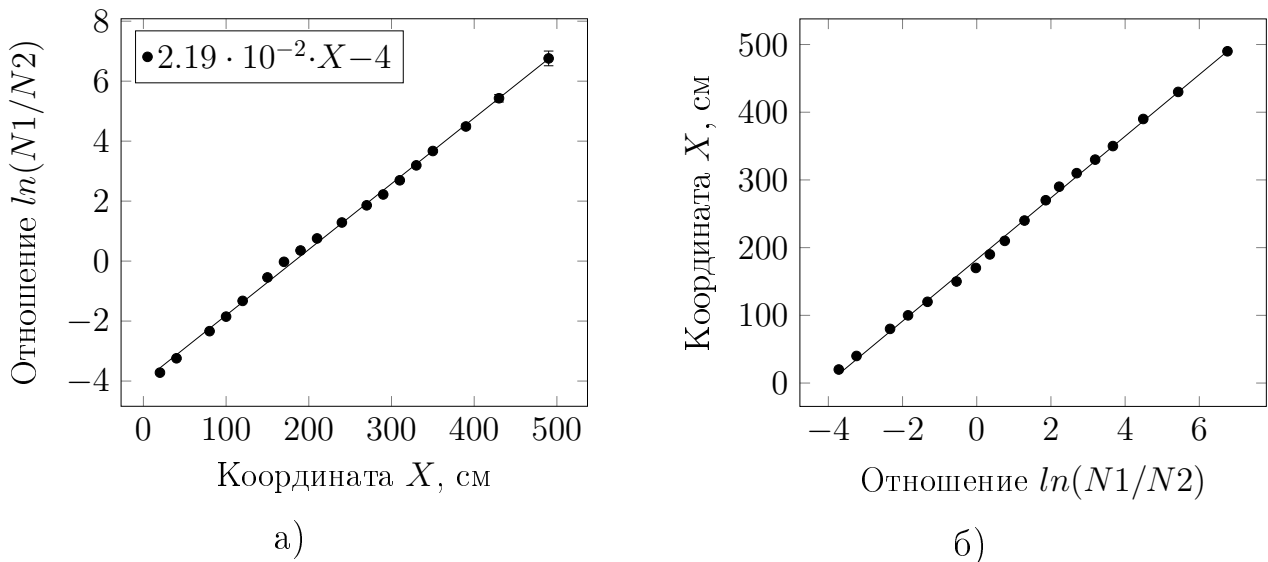


Рисунок 8 – Зависимость логарифма отношения количеств фотонов, зафиксированных на выходах волокна за единицу времени от положения точечного источника (а) и зависимость координаты положения точечного источника от логарифма отношения количеств фотонов зарегистрированных на выходах волокна за единицу времени (б)

Из 8а следует, что экспериментально получена линейная зависимость логарифма отношения количеств оптических фотонов, зарегистрированных на выходах оптического волокна за единицу времени от координаты положения радиационного источника X (функция чувствительности), на рисунке 8б приведена полученная калибровочная функция для макета преобразователя, которая соответствует результатам моделирования (4).

Во пятой главе предлагается новая многоканальная система радиационного контроля и управления с использованием предложенных первичных волоконных преобразователей в качестве элементов системы, которая позволяет проводить детектирование мощности дозы излучения, активности и положения радиационных источников различных видов. Структурная схема предлагаемой системы радиационного контроля и управления показана на рисунке 9. Модель

включает (n) первичных волоконных преобразователей 1, каждый из которых посредством транспортного оптического волокна 2 соединен с отдельным входом дополнительного многоканального оптического коммутатора 3, управляемого с помощью микроконтроллерной системы 5. Выход многоканального оптического коммутатора 3 соединён с входом счетчика фотонов 4. Каждый из волоконных преобразователей находится под действием источника ионизирующего излучения. Микроконтроллерная система осуществляет вторичное преобразование аналогового электрического сигнала в цифровую форму (подсчёт количества импульсов в единицу времени). Интерпретация полученных с выходов преобразователей значений величин мощностей оптических сигналов, пропорциональных количествам импульсов, зарегистрированных за единицу времени на выходе счетчика фотонов, в интересующую величину для каждого волоконного преобразователя осуществляется в персональном компьютере 6, подключённом к микроконтроллерной системе, на основе специальных калибровочных функций, определенных с помощью численных и математических моделей. Также с персонального компьютера на основе полученных дозиметрических данных осуществляется управление исполнительными механизмами и сигнализацией, подключенными к блоку управления исполнительными механизмами и сигнализацией 7. Выработка решений производится на базе алгоритмов, построенных на установке контрольных уровней по мощности дозы радиационного излучения, активности радиационного источника либо допустимых отклонений по координате при контроле положения радиационного источника.

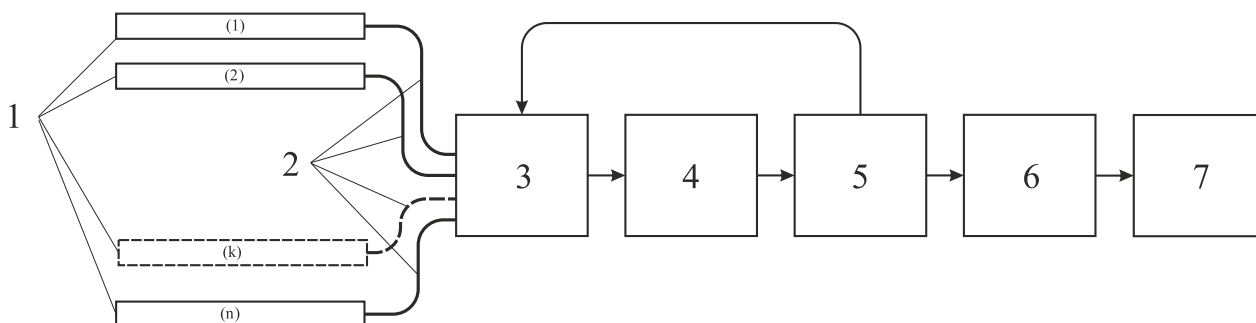


Рисунок 9 – Структурная схема системы радиационного контроля и управления

Преимущество данного подхода, в том что система приобретает свойства модульности, универсальности и расширяемости: система может быть сведена к одноканальной исключением из схемы оптического коммутатора 3, и в тоже время функционал системы может быть расширен за счет подключения дополнительных первичных оптико-волоконных преобразователей универсальным образом, при этом оптико-волоконные преобразователи могут быть предназначены для измерения различных параметров состояния радиационных источников.

Предлагается также блок-схема алгоритма работы программного обеспечения системы радиационного контроля и управления, предусматривающая возможность расширения функционала. Программное обеспечение включает два

модуля: отвечающий за серверную часть, который обеспечивает обмен данными между персональным компьютером и аппаратной частью (микроконтроллерной системой), и клиентский, который обеспечивает пользовательский интерфейс, хранение, интерпретацию и отображение данных, поступающих от микроконтроллера. Блок-схема алгоритма работы программного обеспечения представлена на рисунке 10.

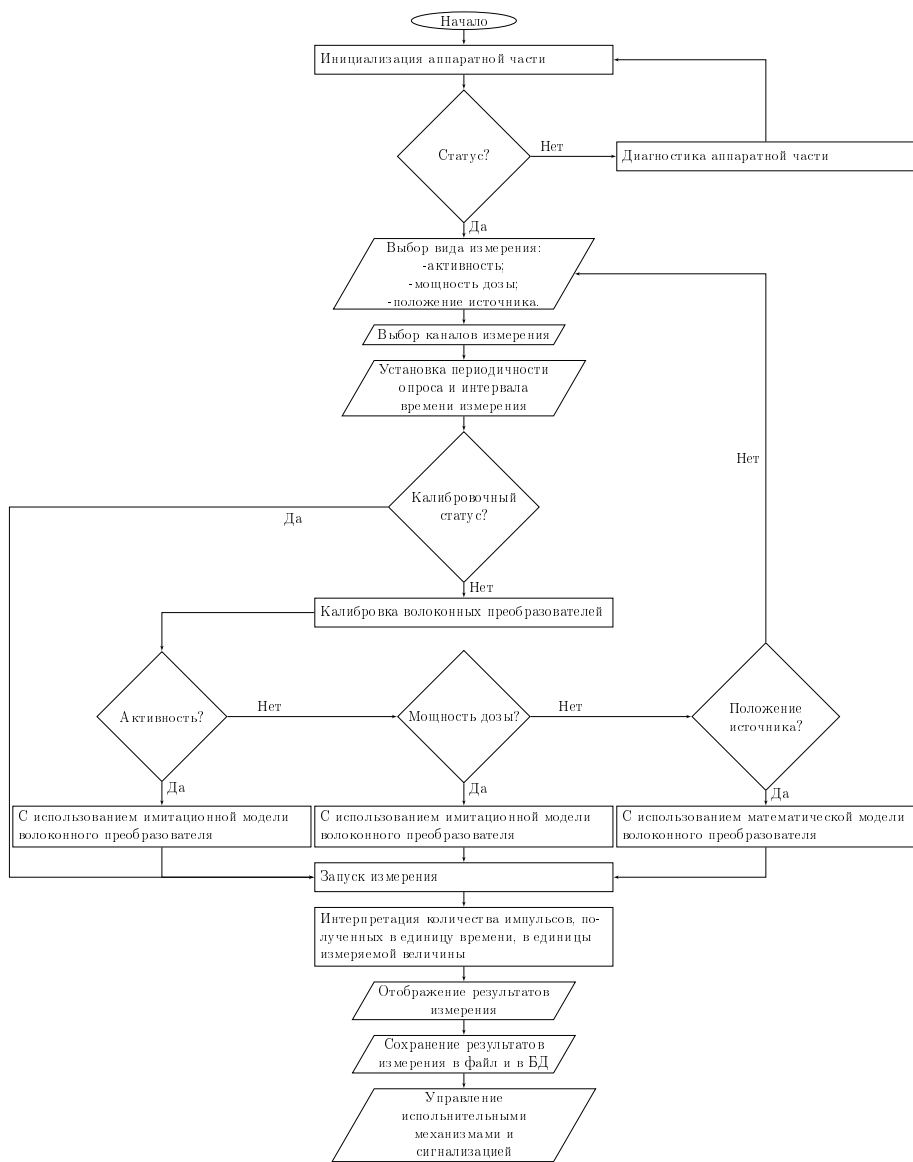


Рисунок 10 – Блок-схема алгоритма работы программного обеспечения автоматизированной системы радиационного контроля и управления

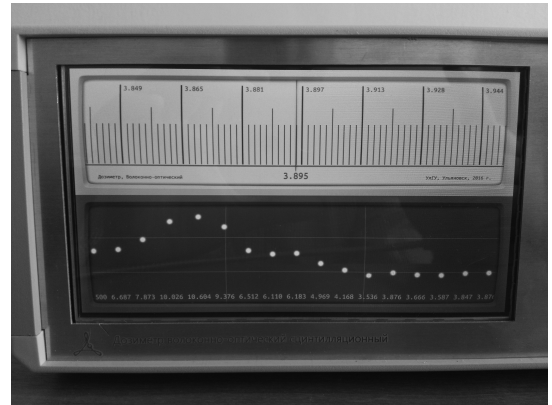
В соответствии с предлагаемым алгоритмом разработано специализированное программное обеспечение для персонального и одноплатного компьютеров. Также разработаны алгоритм и встроенное программное обеспечение для микроконтроллерной системы.

На рисунке 11 показаны экспериментальный образец предлагаемой системы радиационного контроля и управления в стоечном исполнении (а) и ин-

терфейс программного обеспечения для версии системы на базе одноплатного компьютера (б).



а)



б)

Рисунок 11 – Экспериментальный образец многоканальной волоконной системы радиационного контроля и управления в стоечном исполнении (а): 1– блок включающий счетчик фотонов и микроконтроллерную систему, 2–многоканальный оптический коммутатор и интерфейс программного обеспечения для портативной версии системы (б)

В заключении представлены основные результаты работы.

1. Предложены оптимизированная по максимуму чувствительности конструкция нового первичного оптико-волоконного преобразователя на базе сцинтилляционного волокна с чувствительностями 1,96 имп./мКи/с, 45,3 имп./мКи/с, 6,27 имп./мКи/с к энергетическим спектрам излучения радиоизотопов ^{63}Ni , ^{89}Sr , ^{90}Sr соответственно, позволяющая проводить измерения мощности оптического сигнала, наведенного источником радиационного излучения, и его численная модель, которая позволяет определить калибровочную функцию и интерпретировать результаты измерения мощности оптического сигнала в единицы активности радиационных источников в диапазоне 0-100 мКи;

2. Предложены оптимизированная по максимуму чувствительности конструкция нового первичного оптико-волоконного преобразователя с использованием комбинированного сенсорного элемента на базе пластикового сцинтиллятора и спектросмещающего волокна с чувствительностью $3,23 \cdot 10^5$ имп./мГр к рентгеновскому и радиационному гамма-излучению позволяющая проводить измерения мощности оптического сигнала, наведенного источником радиационного излучения и его численная модель, которая позволяет определить калибровочную функцию и интерпретировать результаты измерения в единицы мощности дозы гамма-излучения в диапазоне 0-17 мГр/с;

3. Предложены конструкция нового оптико-волоконного преобразователя на основе эффекта ослабления оптического сигнала в сцинтилляционном волокне с чувствительностью $0,0219 \text{ см}^{-1}$ позволяющая проводить измерения мощностей оптических сигналов, наведенных точечным источником радиационного

бета-излучения и его математическая модель, которая позволяет интерпретировать результаты измерений мощностей оптических сигналов на выходах преобразователя в значения координаты пространственного положения точечного радиационного источника при длине сенсорного элемента до 5 м;

4. Предложена новая многоканальная оптико-волоконная система радиационного контроля и управления, включающая первичные оптико-волоконные преобразователи мощности дозы радиационного излучения, активности и положения радиационных источников с унифицированными оптическими интерфейсами обеспечивающая возможность расширения функционала за счет подключения новых волоконных преобразователей и определения для них специальных калибровочных функций на основе численных и математических моделей.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК по специальности

1. Алексеев А.С. Разработка и исследование сцинтилляционного волоконного радиометра для измерения активностей источников ионизирующего излучения на основе изотопа ^{63}Ni / С.Г. Новиков, А.В. Беринцев, В.В. Светухин, А.А. Черторийский, Н.Н. Андрейчук, Р.А. Кузнецов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т. 16, – №6 – 2014. – С.95-100.

2. Алексеев А.С., Трегубов А.В., Новиков С.Г., Светухин В.В., Беринцев А.В., Приходько В.В., Фомин А.Н., Муралев А.Б., Марков Д.В. Комплекс мониторинга состояния сухих хранилищ отработанного ядерного топлива // Автоматизация процессов управления – 2017. – №2(48). – С.62-71.

3. Алексеев А.С. Разработка персонального носимого дозиметра эффективной дозы с радиочастотным каналом передачи данных / С.Г. Новиков, А. В. Беринцев, А.И. Сомов, В. В. Приходько, П. А. Гуськов, В.В. Светухин //Радиопромышленность – 2018.– Т.28 – № 3. – С. 78–85. DOI: 10.21778/2413-9599-2018-28-3-78-85

4. Алексеев А.С., Приходько В.В., Новиков С.Г., Беринцев А.В., Кадочкин А.С., Светухин В.В., Сомов А.И. Система мониторинга индивидуальных поглощенных доз ионизирующего излучения на основе радиохромной пленки Gafchromic EBТ3 // Автоматизация процессов управления – 2018. – № 4 (54). – С.103-111.

5. Алексеев А.С., Беринцев А.В., Новиков С.Г., Черторийский А.А., Муралев А.Б., Родионов В.А., Светухин В.В. Разработка и исследование волоконного дозиметра для детектирования рентгеновского и гамма-излучений // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру – №4. – 2018. – С.18-24.

Публикации в изданиях, индексируемых Scopus

6. Alekseyev A.S. Simulating a scintillation fiber detector of the activities of ionizing radiation sources / A.V. Berintsev, V.V. Svetukhin, , A.A. Chertoriyskiy, R.A. Kuznetsov, V.V. Prihodko // Results in Physics 6 (2016) – P.16–17
7. Alekseev A.S., Tregubov A.V., Prihod'ko V.V. et al. A Model of a Distributed Calorimetric Fiber Dosimeter Based on Stimulated Brillouin Scattering // Instrum Exp Tech 63 – P.538-542 (2020). <https://doi.org/10.1134/S0020441220050061>
8. Alexeyev, A.S., Prihodko, V.V., Guskov, P.A., Novikov, S.G., Somov, A.I. and Svetukhin, V.V. Technical Note: ID-card-size dosimeter based on radiochromic films for continuous personnel monitoring // Med. Phys.. <https://doi.org/10.1002/mp.14893>

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК по теме исследования

9. Алексеев А.С. Компьютерное моделирование взаимодействия рентгеновского излучения с радиохромными пленками Gafchromic EBТ3 /А.В. Беринцев, С.Г. Новиков, В.В. Приходько// Медицинская физика – 2017. – №3(75). – С.5-9.

Патенты и авторские свидетельства

10. Алексеев А.С. Многоканальная оптоволоконная дозиметрическая система : пат. 154082 Российская Федерация /Новиков С.Г., Черторийский А.А., Беринцев А.В., Светухин В.В., ; заявл. 27.03.2015; опубл. 10.08.2015.
11. Алексеев А.С. Оптоволоконная бета и гамма дозиметрическая система: пат. 167517 Российская Федерация / Черторийский А.А., Беринцев А.В., Светухин В.В., Приходько В.В.; опубл. 04.05.2016.
12. Алексеев А.С. Сенсорный элемент оптоволоконной дозиметрической системы : пат. 174124 Российская Федерация / Новиков С.Г., Беринцев А.В.; опубл. 03.10.2017
13. Алексеев А.С. Система мониторинга поглощенных доз ионизирующего излучения: пат. 2677120 Российская Федерация / Приходько В.В., Новиков С.Г., Беринцев А.В., Сомов А.И., Сапунов В.В., Гуськов П.А., Светухин В.В.; опубл. 01.15.2019.
14. Алексеев А.С.Сенсорный элемент оптоволоконной дозиметрической системы: пат. 193439 /Новиков С.Г., Беринцев А.В., Светухин В.В.; опубл. 29.10.2019.

Основные публикации в других изданиях

15. Алексеев А.С. Моделирование сцинтилляционного оптического волокна BSF-60 для измерения активностей источников ионизирующего излучения. / А.В. Беринцев, В.В. Светухин, С.Г. Новиков, А.А. Черторийский, Н.Н. Андрейчук, Р.А. Кузнецов // Радиоэлектронная техника: межвузовский сборник научных трудов / под ред. В. А. Сергеева. – Ульяновск: УлГТУ, 2015. – С. 192-200.

16. Alekseyev A.S. Simulation and Experimental Study of a Scintillation Fiber Detector of the Activities of ^{63}Ni -, ^{89}Sr - and ^{90}Sr –Based Radiation Sources / S.G. Novikov, A.V. Berintsev, V.V. Svetukhin, A.A. Chertoriyskiy, R.A. Kuznetsov, N.N. Andreychuk, V.V. Prikhodko // Applied Mechanics and Materials – Vol. 835, – P.626-631.

17. Alekseyev A.S. Simulation and Experimental Study of a Scintillation Fiber Detector of the Activities of ^{63}Ni -, ^{89}Sr - and ^{90}Sr –Based Radiation Sources / S.G. Novikov, A.V. Berintsev, V.V. Svetukhin, A.S. Chertoriyskiy, R.A.Kuznetsov, N.N. Andreychuk and V.V. Prikhodko // The 2015 2nd International Conference on Advanced Engineering Technology. –Songdo Convensia, Incheon. – 2015. – P. 59.

18. Алексеев А.С. Волоконно-оптические сенсоры для дозиметрии /С. Г. Новиков, А.В. Беринцев // Фотон-Экспресс 6 (142) спецвыпуск по материалам Всероссийской конференции по волоконной оптике г.Пермь 3-6 октября 2017 года. – Т. 6. – Москва. – 2017. – С.215–216.

19. Алексеев А.С. Моделирование и исследование волоконного дозиметра для измерения мощности дозы гамма-излучения /А.В. Беринцев, С.Г. Новиков, А.А. Черторийский, В.В. Светухин, В.В. Приходько // Радиоэлектронная техника: межвузов. сб. науч. тр. – Ульяновск: УлГТУ. – 2017. – С. 4-12.

20. Алексеев А.С., Новиков С.Г., Беринцев А.В., Приходько В.В. Численный расчет взаимодействия рентгеновского и гамма-излучений с радиохромными пленками Gafchromic EBТ3 // Международная научно-практическая конференция «Ядерная медицина и лучевая терапия: современное состояние и ближайшие перспективы» Москва. Сборник тезисов конференции. – М.: Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна – 2017. – С.6-7.

21. Алексеев А.С., Новиков С.Г., Беринцев А.В., Родионов В.А., Светухин В.В. Экспериментальные исследования волоконного сенсорного элемента для дозиметрии радиационных гамма-источников // VII Международная конференция по фотонике и информационной оптике. Сборник научных трудов. – М.: НИЯУ МИФИ – 2018. – С.144-145.

22. A.S. Alekseyev, V.V. Prikhodko, S.G. Novikov, A.V. Berintsev, A.I. Somov. RFID-based information system for monitoring personal radiation doses // Information Innovative Technologies: Materials of the International scientific – practical conference. /Ed. Uvaysov S. U., Ivanov I.A. – М.: Association of graduates and employees of AFEA named after prof. Zhukovsky. – 2018 – 652 p.

23. Алексеев А.С., Трегубов А.В., Новиков С.Г., Светухин В.В. Исследование композитных армирующих элементов для строительных конструкций со встроенными волоконно-оптическими сенсорами деформации // II Всероссийская конференция «Оптическая рефлектометрия – 2018» 29-31 мая 2018 г., г. Пермь. Сборник тезисов докладов. – Пермь: ООО «М'Арт», 2018. – 63-65с.

24. Алексеев А.С., С.Г. Новиков, А.В. Беринцев, А.А. Черторийский, А.В. Трегубов, В.В. Светухин // Волоконно-оптический позиционно-чувствительный радиометр // Радиоэлектронная техника: межвузов. сб. науч. тр. – Ульяновск: УлГТУ. – 2018. – С. 81-89.

25. Алексеев А.С., Трегубов А.В. Позиционно-чувствительная волоконная дозиметрическая система // XV Всероссийский молодежный Самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике: сборник трудов конференции, (Самара, 13–17 ноября 2018г.).– Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук – 2018. – С.34-40.

26. Алексеев А.С. Волоконные калориметрические сенсоры для дозиметрии / А. С. Алексеев, В. В. Приходько, А. В. Трегубов // Фотон-Экспресс-Наука 2019 спецвыпуск по материалам Всероссийской конференции по волоконной оптике г.Пермь 8-11 октября 2019 года. – Т. 6.– Москва, 2019. – С. 344-345.

27. Алексеев А.С., Трегубов А.В., Приходько В.В., Жуков А.В., Новиков С.Г., Светухин В.В. Модель распределенного калориметрического волоконного дозиметра на основе эффекта вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна // Приборы и техника эксперимента – 2020. – № 4 – С.109-114.

Алексеев Александр Сергеевич

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРВИЧНЫХ ОПТИКО-ВОЛОКОННЫХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ
РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ

Автореферат

Подписано в печать . Формат 60x84/16.

Усл. печ. л. 1,4

Тираж 100 экз. Заказ _.